STUDY ON THEORETICAL GROWTH EQUATION AND DIAMETER STRUCTURE MODEL

理论生长方程与直径结构模型的研究

张建国 段爱国 著



科学出版社
www.sciencep.com

(Q-1440.0101)

理论生长方程
与直径结构模型
的研究

STUDY ON THEORETICAL
GROWTH EQUATION
AND DIAMETER
STRUCTURE MODEL





销售分类建议：生物学/植物学/林业科学

生命科学编辑部
联系电话：010-64012501
http://www.lifescience.com.cn
e-mail:info@lifescience.com.cn

ISBN 7-03-013709-4
定 价：38.00 元

理论生长方程与直径结构模型的研究

STUDY ON THEORETICAL GROWTH EQUATION AND DIAMETER STRUCTURE MODEL

张建国　段爱国　著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统阐述了理论生长方程与林分直径结构模型的研究及其进展。本书共分6章，围绕杉木人工林林分直径结构模拟和预测、优势高生长模拟及其多形地位指数方程的研制、Fuzzy 分布函数的应用、直径动态变化规律和密度效应的关系等进行了论述，从方程-林分匹配性这一全新角度，揭示了理论生长方程的解析性质和林分结构的实质特点，以期进一步推动理论生长方程及林分直径结构模拟和预测的研究，为杉木人工林的定向培育提供了科学可靠的理论和实践依据。

本书可供林学工作者和高校相关专业的师生学习、使用。

图书在版编目(CIP)数据

理论生长方程与直径结构模型的研究/张建国，段爱国著. —北京：科学出版社，2004

ISBN 7-03-013709-4

I. 理… II. ①张… ②段… III. ①林分生长-方程-研究 ②林分结构-结构模型-研究 IV. S758.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 073929 号

责任编辑：莫结胜 邱 璐 卜 新/责任校对：陈丽珠

责任印制：钱玉芬/封面设计：耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

http://www.sciencep.com

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年10月第 一 版 开本：B5 (720×1000)

2004年10月第一次印刷 印张：10 1/2

印数：1—1 800 字数：192 000

定价：38.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈新欣〉)

前　言

森林是地球生态系统的主体，也是人类利用木材的唯一来源，森林的可持续发展决定着人类社会和林业的可持续发展。当前，人类面临着环境与发展两大问题，环境的日益恶化严重阻碍了社会、经济的发展，保护天然林资源已成为全人类共同的心愿和行动。但是，这里有个问题，天然林得到保护，必然导致人类木材需求来源的大量减少，如何解决这一问题，使自然资源保护与木材利用兼顾、协调起来，人们已把希望的目光越来越多地投向了迅速发展的人工林事业。

我国出于保护环境、实现可持续发展的目的，在21世纪伊始，启动了耗资巨大的天然林保护工程。与此同时，为保证工程的顺利实施和积极解决我国木材市场供需存在的巨大缺口，国家林业局在整合后的六大林业重点工程中提出重点地区以速生丰产用材林为主的林业产业基地建设工程。人工林的大力发展可谓大势所趋。

杉木[*Cunninghamia lanceolata*(Lamb.) Hook.]是7500万年前遗留的活化石，它是我国亚热带温暖湿润地区特有的优良速生针叶树种，素以分布广、生长快、繁殖易、病虫害少、材质好、产量高、栽培历史悠久而闻名中外。在我国，杉木在速生丰产用材林中比重极大。据1987年统计，全国杉木人工林面积有11 929.6万亩，蓄积量达27 069.8万立方米，占全国造林面积的1/10。杉木为我国主要用材林树种，杉木人工林的发展有其重要的战略意义。建国以来，由于立地评价、良种选育、密度控制等方面研究成果的广泛推广应用，有力地推动了杉木人工林栽培技术的进步。

20世纪80年代以来，有关杉木造林经营技术的科学研究工作成绩卓著。“六五”、“七五”、“八五”、“九五”期间，中国林业科学研究院主持的“杉木产区区划、立地类型划分及立地评价的研究”、“杉木人工林集约栽培技术研究”、“杉木建筑材优化栽培模式研究”和“杉木建筑材树种遗传改良及大中径材培育技术研究”等国家攻关专题项目，在江西、福建等地建立了规模较大的试验林，这些试验林按照我国杉木主要产区设立，分别代表东部的武夷山区、南部的南岭山地、西部的雪峰山区及中北部的武功山区。这些试验林由于设计合理、保存较好且经过连续而长期的观测，拥有无比珍贵的研究价值，值得不断探索利用。本书的编写就是以这些固定试验地数据资料以及所收集整理的更早期杉木临时样地调查资料为基础撰写而成。

人工林经营的目的就是要达到定向、速生、丰产、优质、稳定及高效，而要实现这一目的，就必须清楚地了解人工林树种的生长特性及生长过程。目前国际

上对此方面研究的一个重要方向是利用模型描述复杂的林木群体生长规律，通过模拟探索多变条件下的林分生长动态，从而预测林分生长及经营措施对林木生长的影响，制定优化经营方案，实现林分的最优经营管理。林分直径结构是林分结构的基本规律之一，是估算林分材种出材量、确定合理经营周期和准确评定生产力的基础，具有其重要的理论和实践意义，精确地模拟和预测林分直径结构是进行营林效果评价的前提，利用理论生长方程构建林分直径结构模型是现代森林经营的先进手段。本书共分 6 章，重点论述了理论生长方程和林分直径结构模型的研究进展、杉木人工林优势高生长模拟及其多形地位指数方程的研制、杉木人工林林分直径结构模拟和预测、Fuzzy 分布函数在杉木人工林林分直径结构上之应用研究、林分密度对杉木人工林直径结构动态变化的影响等方面的研究内容，旨在推动理论生长方程及林分直径结构模拟和预测的研究，并为杉木人工林的定向培育提供科学可靠的理论及实践依据。本书的编写得到了中国林业科学研究院林业研究所童书振先生的关心和指点，谨于付梓之际表示深深的感谢！

限于作者的水平，书中肯定有不少错误和不当之处，敬请读者和同行批评指正。

张建国　段爱国

2003 年 12 月

Abstract

Chapter 1

Theoretical equations can scientifically and reasonably describe the growth and distribution of forest. This chapter relatively and comprehensively elaborates the origin, present situation of application and development, complicated relationship among theoretical equations, in order to make people have a clear knowledge of theoretical equations and scientifically use them, and make application fields wide to promote the further development of theoretical equations. The modeling and prediction of stand diameter structure are of important value in theoretical and practical study, have broadly applied prospects in the field of forest management and forest resource, and even are the nucleus of stand growth model. This chapter, from two aspects, relatively and thoroughly discussed the internal and external study situation about the modeling and prediction of stand diameter structure model, summarily indicated that the study on stand diameter structure model is unfolded around two methods—parametric approach and nonparametric approach, mainly introduced a few main modeling and prediction methods such as theoretical equation method and k-nearest neighbor estimation method, and a few common evaluation and prediction methods such as percentile method and regression method.

Chapter 2

The study on polymorphic dominant height models and polymorphic site index equations is always the emphasis and difficulty in the field of forest growth model. This chapter adopted difference methods first to build the polymorphic site index equations based on six theoretical growth equations such as Korf, and then proceed to explore their polymorphic meaning and analyse their modeling qualities, finally reach several main conclusions: ① Based on theoretical growth equations, through difference methods the polymorphic dominant equations can be built on a good biological basis; ② The inflection points of theoretical growth equations have most important effect on their modeling precision of dominant height growth; ③ Difference equations have better modeling effect on the Statistics at a wider range of region; ④ The polymorphic

dominant height equations, such as the two-parameter polymorphic forms of Korf, Richards, Weibull and three-parameter polymorphic form of Sloboda, show higher modeling precision; ⑤ The entirely reasonable polymorphic site index equations can be built when excellent polymorphic dominant height growth models are adopted.

Chapter 3

It is analysed and explored that the mathematical characteristics of six growth equations and their theoretical basis are applied to modeling of stand diameter structure. The long-term observation data of permanent sample plots of China fir are sorted. The six equations are applied to modeling of stand cumulative diameter distribution in order to master modeling parameters and properties of every growth equation in the field of diameter structure. The results show that Richards at most time presents a kind of Logistic, and Weibull has its inflection point. Except for Mitscherlich function, modeling precision of every growth function is very high. The optimum rate of Richards, Weibull, Logistic, Gompertz, Mitscherlich and Korf successively decrease. The whole precision of Richards, Logistic, Weibull, Gompertz, Korf and Mitscherlich successively decrease. The relative growth rate of functions with index of variable has the higher precision than those with power of variable. Equations with three parameters have the higher precision than those with two.

For growth equations, it is significant to explore the sense of their parameters. With the highest precision in the above-mentioned equations, Richards was selected to develop this study. The results of stepwise regression show that parameter k is affected by age, site index, average diameter and density remarkably, and their affection decreases in turn. The stand factors that remarkably affect parameter m in turn are age, average height, average diameter and density, and the relative coefficient of regression is smaller than the former. Parameter b is affected remarkably by stand factors such as average height, average diameter and density in turn, and its relative coefficient of regression is very small. Parameter k and m have remarkably negative linear or nonlinear relations with age and average diameter, and nonlinear relation is stronger. Parameter k has the stronger relations with them than m in either linear or nonlinear form, the relation between the two parameters(k and m) and age is affected by site index, density and thinning intensity. Parameter k and m have remarkably positive relativity with density. Parameter k and m respectively present the tendency of descent with the increase of site index and average height, both of them present remarkably linear relativity.

The application of theoretical growth equations in the field of stand diameter structure plays an important role in both theory and practice. In order to look for the inside and outside mechanism, and distinguish and use theoretical growth equations correctly, this chapter in view of stands and equations makes further studies and discussions. The results show that factors such as age, site index, density and thinning intensity have no distinct impact on modeling precision of the six growth equations mentioned above, but the difference of modeling precision is obvious among the equations. The inflection points of curve of stand cumulative diameter distribution range from 0.4 to 0.6, the distribution of inflection point value of growth equations has deep relations with modeling precision of functions, the wider the range of effective inflection points of the fittest equation curve is, and the higher the precision of inflection points is, the more obvious the validity of inflection points is, and the higher the modeling precision of equations is.

Chapter 4

According to the fuzziness of stand *DBH* distribution of China fir plantations, this chapter introduces Fuzzy distribution functions into modeling . It takes good effect. This chapter discusses the adaptability of Fuzzy distributions and the reasons that make modeling precision of them discrepant, and draws main conclusions as follows: ① The modeling precision of nine kinds of functions is shown as Fuzzy-Γ_5> Logistic> Fuzzy-Γ_3> Fuzzy-Γ_4> Fuzzy-C> Fuzzy-Γ_2> Gompertz> Korf> Fuzzy-Γ_1, among them, the Fuzzy-Γ_5 distribution of development type has the best modeling properties. Parameters of Fuzzy-Γ_3 are closely correlated with stand age and density. ② For different stands, initial planting density has larger influence on diameter cumulative distribution, but for the same stand, age plays main role. ③ Stand diameter cumulative distribution has inflection point, the size of which negatively correlates to stand age and initial planting density. The main range of inflection point of diameter cumulative distribution is 0.4~0.6, and there is a central distribution point about 0.5. For average precision of samples, when inflection point of distribution function lies in the main range, its modeling precision is higher, and the closer it nears 0.5, the higher its precision is. ④The stand age and initial planting density have different influences on modeling precision of every distribution form. Fuzzy-Γ_5, Fuzzy-Γ_3 and Logistic have stable and good modeling properties.

Chapter 5

The prediction of stand diameter structure can provide theoretical foundation for scientifically engaging in direct silviculture of plantations. This Chapter, from four aspects such as growth equations and so on, discusses the reason that influences prediction effects of the stand diameter structure of China fir plantations, compares parametric prediction method with parametric recovery one, and makes a thorough study on the reason that influences adaptation degree of test in the view of stand factors. The results are as follows: The influences of different recovery models, different modeling materials, different test materials and different growth equations on adaptation degree of test are respectively greatly obvious, sometimes obvious, obvious or greatly obvious and not obvious. When recovery model adopts the simplest power function, the adaptation degrees are all over 50%. The prediction effect of Richards is better, and there is only one adaptation degree under 60% in six cases. Parametric prediction methods and parametric recovery methods both have higher adaptation degrees of test in prediction, superiority and inferiority, and well applied prospects. Stand initial planting density is different from factors such as age, site index and thinning, etc., its adaptation degrees of prediction in different cases have a certain regulation in general, which has obvious influence on adaptation degree, and such a prominent effect of density should be considered while making classified prediction.

Chapter 6

Using data from permanent plots, this chapter studies the dynamics of diameter structure of China fir plantations and influence of density on it. Some criterions are adopted, such as skewness, kurtosis, variance coefficient, cumulative diameter distribution curves and frequency distribution, etc. The results show: ①At age of 6~20, the value of skewness changes from negative to positive, the absolute value of skewness first gets small, then big. At any time, high-density stands have the bigger skewness, and the higher the density of stands is, the earlier the skewness varies from negative to positive. ②The law of kurtosis varying with age is not obvious. Kurtosis of low-density stands is bigger than that of high-density ones, and both their values of kurtosis tend towards 0 at last. ③The *CV* of diameter shows weakly increasing tendency with age on the whole, and declines at an earlier stage, then increases after canopy closure. Non-evenness of high-density stands is bigger, and the higher the

density is, the earlier the *variance* coefficient of diameter shows increasing tendency. ④At any range of cumulative frequency distribution, the smaller the density is, the bigger the middle value of diameter class is. It benefits the formation of middle and big wood. The tree distribution of diameter class testifies these conclusions.

目　录

前言

Abstract

1　理论生长方程及林分直径结构模型研究概述 …… 1

1.1　理论生长方程研究概述 …… 1

1.2　林分直径结构模拟与预测研究概述 …… 8

参考文献 …… 18

2　杉木人工林优势高生长模拟及其多形地位指数方程的研制 …… 22

2.1　材料与方法 …… 23

2.2　优势高生长模型模拟性能的比较分析 …… 28

2.3　多形地位指数方程的研制 …… 36

2.4　结论 …… 37

参考文献 …… 38

3　杉木人工林林分直径结构模拟 …… 40

3.1　6 种生长方程在杉木人工林林分直径结构上之应用 …… 40

3.2　理论生长方程对杉木人工林林分直径结构的模拟研究 …… 65

参考文献 …… 73

4　Fuzzy 分布函数在杉木人工林林分直径结构上之应用研究 …… 75

4.1　材料与方法 …… 75

4.2　5 种 Fuzzy 分布函数拟合效果分析 …… 78

4.3　一种拓展型的 Fuzzy 分布函数 …… 79

4.4　Fuzzy 分布与理论生长方程模拟精度的比较分析 …… 82

4.5　林分因子对 Fuzzy 等分布函数模拟精度的影响 …… 83

4.6　结论 …… 86

参考文献 …… 87

5　杉木人工林林分直径结构动态预测 …… 88

5.1　材料与方法 …… 89

5.2　生长方程预测效果之影响因子的探讨 …… 89

5.3　参数预测法和参数回收法预测效果的比较研究 …… 92

5.4　林分因子对预测效果的影响研究 …… 94

5.5　结论与讨论 …… 96

参考文献 …… 97

6 杉木人工林林分直径结构动态变化规律及其密度效应的研究 ······ 98
6.1 材料与方法 ······ 98
6.2 林分直径结构偏度变化及密度对其的影响 ······ 99
6.3 林分直径结构峰度变化及密度对其的影响 ······ 101
6.4 林分直径变动系数变化及密度对其的影响 ······ 102
6.5 林分直径株数分布和累积分布的变化情况及密度对其的影响 ······ 104
6.6 结论 ······ 106
参考文献 ······ 107
附录Ⅰ 树高生长方程参数值及其统计结果 ······ 108
附录Ⅱ Richards 等 6 种理论生长方程模拟林分直径分布的参数表 ······ 119

Contents

Preface
Abstract
Chapter 1 An outline of studies on theoretical growth equation and stand diameter structure model 1
1.1 An outline of studies on theoretical growth equation 1
1.2 An outline of studies on modeling and prediction of stand diameter structure 8
Referrences 18
Chapter 2 Modeling of dominant height growth of China fir plantations and its development of polymorphic site index equations 22
2.1 Materials and methods 23
2.2 Comparative analysis of modeling properties among dominant height growth models 28
2.3 Development of polymorphic site index equations 36
2.4 Conclusion 37
Referrences 38
Chapter 3 Modeling of stand diameter structure of China fir plantations 40
3.1 Application of six kinds of growth equations in the field of stand diameter structure of China fir plantations 40
3.2 Modeling studies of theoretical growth equations on stand diameter structure of China fir plantations 65
Referrences 73
Chapter 4 Applied studies on Fuzzy distribution functions in the field of stand diameter structure of China fir plantations 75
4.1 Materials and methods 75
4.2 Analysis of fitting effects of five kinds of Fuzzy distribution functions 78
4.3 A kind of Fuzzy distribution function of development type 79
4.4 Comparative analysis of modeling precision between Fuzzy distribution and theoretical growth equation 82
4.5 Effects of stand factors on modeling precision of distribution functions such as Fuzzy and etc 83

4.6 Conclusion 86
Referrences 87
Chapter 5 Dynamic prediction of stand diameter structure of China fir plantations 88
5.1 Materials and methods 89
5.2 Exploration of factors influencing forecast effects of growth equations 89
5.3 Comparative studies on prediction effects between parametric prediction method and parametric recovery method 92
5.4 Studies on Influence of stand factors on prediction effects 94
5.5 Conclusion and discussion 96
Referrences 97
Chapter 6 studies on dynamics of stand diameter structure of China fir plantations and its effect of density 98
6.1 Materials and methods 98
6.2 Skewness variance of stand diameter structure and influence of density on it 99
6.3 Kurtosis variance of stand diameter structure and influence of density on it 101
6.4 *CV* of stand diameter and influence of density on it 102
6.5 Variance of frequency and cumulative distribution of stand diameter and influence of density on it 103
6.6 Conclusion 106
Referrences 107
Appendix I Parametric values of height growth equations and their statistics 108
Appendix II Parametric table of 6 kinds of theoretical growth equations' modeling the distribution of stand diameter 119

1 理论生长方程及林分直径结构模型研究概述

研制森林生长与收获预估模型始终是森林学研究的中心任务。随着森林学知识基础的改变以及林业信息需求的转变，对模型研究提出了新的更高的要求，模型的研究日渐深入、完善及实用。在森林生长模型研究领域，理论生长方程具有良好的理论解释基础及模拟性能。目前对理论生长方程在林分水平上的应用研究及理论生长方程结构组成形式的剖析均已做过大量的工作，但对方程的数学解析性、方程彼此间的联系和转换关系及其在直径结构方面的应用，尚缺乏系统深入的了解和比较应用研究，对其适用性缺乏足够的分析。就三大模拟模型之一的径阶分布模型而言，已从早期的以概率分布函数为代表的经验模型向以复杂的生理生态为基础的理论生长方程过渡，而且近 20 年来，林分直径结构模型的研究呈现出了许多新的变化。鉴于此，本章对理论生长方程及林分直径结构模型的研究进展做了较为全面的论述。

1.1 理论生长方程研究概述

理论生长方程是指在生物生长模型研究中，根据生物学原理作出某种假设，建立有关生物体大小的微分方程，解出并代入其初始条件或边界条件而导出的模型。它的特点包括逻辑性强、适用性较大、参数可做出生物学解释以及可从理论上对尚未观察的事实进行预测。

当人们考察树木的整个生长过程时，会发现它们的生长遵循一条“S”形曲线，尽管受到环境的影响会出现一些波动，但总的生长趋势是比较稳定的。由于在一个具体的林分内，林分内单株树木的生长在理论上呈“S”形曲线，由单株生长所构成的林分整体生长亦呈“慢—快—慢”的态势，而且由分化所引起的林木径阶株数百分比累积分布也呈现“S”形状态。因此，“S”形或近似“S”形的理论生长方程可以应用于单株、林分及径阶水平的林木生长或分布，即可被用作构建一类、二类及三类模型。不同的理论生长方程适合描述的对象不同，就同一对象而言，“S”形方程的参数个数、结构组成及拐点取值情形对方程模拟精度具有至关重要的影响作用。纵观理论生长方程的发展历程，其经久不衰、应用日渐广泛的内在原因可归结为两点：一是其理论根基的深厚；二是其数学表达式的灵活性及较强的可移植性。目前，对理论生长方程的研究已远远超出了方程原有的含义。鉴于理论生长方程应用领域的广阔，本文对几种主要理论生长方程的起源、应用发展现状及方程间错综复杂的关系予以较为全面的阐述，旨在使人们对理论生长

方程有个清醒的认识并适时、合理地使用之，进而拓宽其应用研究领域以及推动理论生长方程的深入发展。

对于理论生长方程，目前研究、应用较多的主要有：坎派兹式(Gompertz 方程)、逻辑斯蒂式(Logistic 方程)、米切尔里希式(Mitscherlich 方程)、贝塔兰菲式(Bertalanffy 方程)、理查德式(Richards 方程)、舒马赫式(Schumacher 方程)和科尔夫式(Korf 方程)等 7 种。下面重点就这些方程的研究应用情况进行介绍。

1.1.1 理论生长方程的发展现状

1.1.1.1 Gompertz 方程

上述 7 种理论生长方程中，Gompertz 和 Logistic 方程被提出的时间最早，且最初均用于描述种群增长及分布问题。

坎派兹式是由 Benjamin Gompertz 于 1825 年首先提出，用来描述人口衰亡及年龄分布状况。一个世纪以后，该式被用作生长曲线方程，广泛地应用于生物学和经济学领域。Wright 认为“以相对生长率作为测定指标的平均能力多少按一定的百分率下降”，即生长率与生长衰减因子的对数成比例，依此假设原理就可导出 Gompertz 式。1932 年，Winsor 为使 Gompertz 方程更便于应用，将该方程写如下式(1-1)。日本学者末田达彦在研究树干半径生长曲线适合性及理论干曲线方程时应用了式(1-1)，段爱国等(2003)应用该方程模拟林分直径分布时，其精度排在第 4 位。

$$y = k\exp[-\exp(a - bx)] \tag{1-1}$$

其中，$k > 0$，$b > 0$。

也有一些学者在利用坎派兹式时采用另一种表达方式

$$y = k\exp[-a\exp(-bx)] \tag{1-2}$$

上野洋二郎(1988)应用式(1-2)对单木的生长进行了研究；吴承祯等(1998)将其应用到杉木人工林直径分布结构的研究上，结果表明适合性良好。实质上，式(1-1)与式(1-2)并无多大区别，仅 a 值的取值范围略有不同而已。Gompertz 方程存在一个拐点，仅由渐进线参数决定，致使方程的灵活性受到一定程度的影响而降低。

1.1.1.2 Logistic 方程

逻辑斯蒂式是由比利时数学家 Verhulst (1838)首创，用于描述人口的增长规律，方程的微分、积分形式分别为式(1-3)、式(1-4)。之后，Pear 和 Reed (1920)将其用来描述美国人口增长过程。逻辑斯蒂式大概是生态学上最著名的方程，自创立至今已有 160 多年，引起全世界学者广泛深入的研究。惠刚盈(1995)在国内首次将该方程应用于林分结构的研究。该方程反映生物种群增殖率与环境中的营养物质之间呈一种线性关系，这种线性关系是生物学上极为复杂关系的一种近似表达。

方程的表达式可写如下式(1-5)。应用该方程模拟林分直径分布时，其精度仅次于 Richards 方程。

$$dy/dx = dy(1-y/Y_{max}) \tag{1-3}$$

$$y = Y_{max}/\{1+(Y_{max}-y_0)/y_0 \cdot \exp[-d(x-x_0)]\} \tag{1-4}$$

$$y = C/(1+e^{p-qx}) \tag{1-5}$$

式(1-5)中 C 与式(1-4)中 Y_{max} 均为上渐近线值，两者相等；$p = \ln[(Y_{max}-y_0)/y_0] + dx_0$，$q = d$，$q/Y_{max}$ 为内禀生长率；x_0、y_0 分别是 x、y 的初值，且 C，$q>0$ 。逻辑斯蒂式在生态学和经济学中广泛成功的运用，主要是因为其具有营养动力学上的说理模型的性质，而且它是一条标准的“S”形曲线，而自然界和社会中大量的事物变化又均体现出这一规律(李文灿 1990)。然而，Logistic 方程所建立的理论基础虽然颇合自然界的实际(自然界营养太缺乏，营养物质的增加立即引起增殖率的增加，几乎成正比)，但在营养物质较丰富时(如在微生物的培养和发酵中)，是不能成立的。鉴于此，崔启武和 Lawson(1982)提出了一个新的理论生长模型，该模型为马尔萨斯指数方程和逻辑斯蒂方程的融合与扩充。鉴于 Logistic 方程的拐点在渐进值的 1/2 处，张大勇(1985)在原方程的基础上提出了如下式(1-6)。

$$y = C/[1+\exp(p-qx)]^{\theta} \tag{1-6}$$

方程中参数θ是一个常数，C，$q>0$，式(1-6)的拐点可以在 1/2 左右取得，从而在理论上大大提高了逻辑斯蒂方程的灵活性。

1.1.1.3 Mitscherlich 方程

米切尔里希式由 Mitscherlich 于 1919 年提出，用来描述植物对环境因子的反应，在农业和经济学中，此方程被称为“收益递减律”(law of diminishing returns)。最初，Mitscherlich 提出的方程形式为

$$y = A(1-e^{b_1x_1})(1-e^{b_2x_2})$$

式中，y 为收获量；x_1，x_2 为控制增长的因子。

若把时间看成是一个最重要的影响树木生长的因子，且仅取它为唯一的控制因子，则上式可化为最简。理查德(1969)把它称之为单分子式，其表达式形式可写为

$$y = A[1-l\exp(-mx)] \tag{1-7}$$

式中，A 为上渐近线值，l 为与 y 初值有关的参数，m 为内禀生长率。$A>0$，$m>0$，$0<l<1$。在以后的许多研究中，人们均习惯采用式(1-7)当 $l=1$ 时的二参数方程形

式，取得了较好的效果。

单分子式是分析方程中最简单的方程，它没有拐点，相当于理想的生长曲线。有研究(Sweda　1984)认为任何树木的生长(如高生长和直径生长)一般均符合单分子式所描述的生长过程。然而作为一种无拐点的生长方程，其模拟精度较低。

1.1.1.4　Bertalanffy 方程

贝塔兰菲式是由 Von Bertalanffy(1957)在德国著名生理学家 Putter(1920)提出的表面积定律的基础上建立的。通过分析动物的生长，Von Bertalanffy 发现在动物生长期间，动物的体重增长速率为同化速率与消耗速率之差，而后两者分别和同化器官的大小以及动物体重成比例。Cooper(1961)在研究美国亚利桑那州北部西黄松林林分密度及断面积生长方程后认为，应用 Bertalanffy 方程进行林木分析可能比 Logistic 方程更佳，并建议将其引入森林生长研究中。该方程可表示为

$$\mathrm{d}W/\mathrm{d}x = R_a - R_x = aF - \gamma W$$

式中，F 为同化器官重，W 为体重，R_a 为同化速率，R_x 为消耗速率。

由相对生长关系，有 $F = rW^m$，因此上式可变形为

$$\mathrm{d}W/\mathrm{d}x = \eta W^m - \gamma W \tag{1-8}$$

式中，$\eta = ar$。

当 $x = 0$ 时，$W = W_0$，则式(1-8)的积分形式为

$$W = \{\eta/\gamma - (\eta/\gamma - W_0{}^{1-m})\mathrm{e}^{[-(1-m)\gamma x]}\}^{1/(1-m)} \tag{1-9}$$

Richards 认为式(1-9)中的 m 取值为 2/3，这样 Bertalanffy 方程可简写为

$$y = A[1 - B\exp(-kx)]^3 \tag{1-10}$$

其中，参数 A 为 y 的最终值，即上渐近值；参数 B 决定 $x = 0$ 时生长因子的大小；参数 k 与生长速度有关。

Bertalanffy 方程的优点在于它理论基础的严密性，揭示出了生长基础的生理机制。但这一理论形成时的研究对象为动物生长，具有一定的局限性。因此，一定程度上限制了该方程在其他应用研究(如植物应用研究)中所能表现出的灵活性。

1.1.1.5　Richards 方程

在林学方面，描述树木生长及林分生长过程时，应用最广泛的就属 Richards 方程，它是由理查德基于 Von Bertalanffy 生长理论扩展而来。Richards(1959)在研究植物的生长时认为，对植物生长而言，Bertalanffy 方程(1-8)中的 m 的可能取值范围为 $m>0$。其实，该方程早被 Mitscherlich 于 1919 年报道过。世界各国在研究林木生长模型时多采用 Richards 方程，主要应用在以下几个方面：①与林分密度

有关的林分断面积生长模型；②树高生长及地位指数研究；③林分直径结构研究。

Richards 方程来源于 Bertalanffy 方程，式(1-8)中 $m>0$ 时有

$$dW/dx = \eta W^m - \gamma W \text{（当 } m>1 \text{ 时，} \eta\text{、}\gamma<0\text{；当 } 0 \leqslant m<1 \text{ 时，} \eta\text{、}\gamma>0\text{）}$$

上式的积分式经简化整理可得 Richards 生长函数

$$y = A[1 \pm B\exp(-kx)]^{1/(1-m)} \tag{1-11}$$

式中，$m \geqslant 0$，且 $0 \leqslant m<1$ 时取“$-$”；$m>1$ 时，取“$+$”。$A = (\eta/y)^{1/(1-m)}$；$B = (\eta/\gamma - y_0^{1-m})/(\eta/\gamma)$；$k = (1-m)\gamma$。$A$、$B$、$k$ 参数含义同式(1-10)。

Richards 方程的标志是它的灵活性，这个方程的价值在于它的精度和在树木与林分生长研究中比其他方程更多的应用。随着方程中 m 取值的变化，它可转化为其他形式的方程。

1) $m<1$ 时，式(1-11)可写为

$$y = A[1 - B\exp(-kx)]^{1/(1-m)} \tag{1-12}$$

式(1-12)即人们通常应用的 Richards 方程的表现形式。

2) $m>1$ 时，式(1-11)可写为

$$y = A[1 + B\exp(-kx)]^{1/(1-m)} \tag{1-13}$$

式(1-13)与 Logistic 方程的扩展式(1-6)形式一致，仅参数不同。

3) $m = 0$ 时，式(1-11)变为 Mitscherlich 生长函数

$$y = A[1 - B\exp(-kx)] \tag{1-14}$$

4) $m = 2$ 时，式(1-11)化为 Logistic 方程，这一点从考察两式的微分式可以明确得到，也揭示了两方程间的微妙关系。

$$y = A[1 + B\exp(-kx)]^{-1} \tag{1-15}$$

5) $m = 1$ 时，方程就转化为 Gompertz 生长函数，对此上野洋二郎等(1988)经过数学推导提出异议，指出该种情况下 Richards 方程为一指数方程。

$$y = A\exp[-B\exp(-kx)] \tag{1-16}$$

以上各式中，A，B，$k>0$。

如上所述，Richards 方程因为其深厚的理论基础及其形式的灵活多样而具有广泛的适应性、合理解析性和良好的预测性。后来，Schnute(1981)基于简明的生物学原理——加速生长，导出了一个包含迄今为止所有理论生长函数的方程，被认为值得推广应用。其中有研究(Bredenksmp 1988，杨荣启等 1989)认为该方程

能够描述 Richards 方程所不能描述的一些生物生长现象。但也有研究认为 Schnute 方程无论是其假设、解的形式，还是反映生长曲线的特征值均与 Richards 函数相同，是 Richards 方程的另一种解的表达式。然而，从事实和研究结果来看，Richards 方程还是存在不足之处。张少昂(1986)就曾对 Richards 方程的适用条件和其局限性进行了一些探讨，并提出了一种认为可以更适合描述树木或林分生长过程的新的理论生长方程。

1.1.1.6 Schumacher 方程

舒马赫式是由 Schumacher(1939)基于同龄纯林树木的生长百分比与年龄成反相关的假设原理而得出的一个较为简明的树木生长方程。方程的原始表达式

$$dV/V = k \cdot d(1/A) \tag{1-17}$$

式中，V、A 分别为林分材积和年龄，k 为与林分立地指数和立木密度相关的常数值。

对式(1-17)积分则有

$$\lg V = a + b(1/A) \tag{1-18}$$

式中，b 为 0.4343k，a 为林分材积最大值的常用对数。

李久先(1996)在应用 Schumacher 方程时采用如下形式

$$\ln y = a - b \cdot 1/x \quad (b>0) \tag{1-19}$$

式(1-19)进一步可表示为

$$y = k\exp(-b \cdot 1/x) \quad (k>0,\ b>0) \tag{1-20}$$

式(1-18)中，如 A 的指数为 c，则有：$\lg V=a+b(1/A^c)$。对于这个 Schumacher 方程的拓展式，有些研究者径直称为 Schumacher 方程，韩国学者称其为 Modify-Schumacher 方程。Sahoo(1998)曾用该式研究过立地指数曲线，得到较好的效果。同样，依上述转化步骤式(1-20)可表述为

$$y = k\exp(-b \cdot 1/x^c) \quad (k>0,\ b>0,\ c>0) \tag{1-21}$$

Schumacher 方程存在两种表达形式——线性形式(1-19)和非线性形式(1-20)，其非线性形式期望较线性形式具有更好的拟合精度。

1.1.1.7 Korf 方程

Korf 方程由前捷克斯洛伐克林业工作者 Korf 于 1939 年首次提出。之后，又被重新发现几次，尤其是瑞典林学家 Lundqist(1957)利用该方程成功地构造了欧洲赤松及挪威云杉人工林的树高生长模型，故也有人称其为 Lundqist-Korf 方程。后来，李凤日和 Zeide 相继运用 Korf 方程描述树高及胸径生长，取得较好效果。Korf 方程的表达形式为

$$y = A\exp(-b \cdot 1/x^{c}) \qquad (A,\ b,\ c>0) \qquad (1\text{-}22)$$

我们可以发现 Korf 方程(1-22)与 Schumacher 方程的拓展式(1-21)具有完全相同的数学表达式，Korf 方程中参数 c 值取 1 时即 Schumacher 方程。Zeide 在研究树木直径生长时发现，相对生长率是年龄的幂函数，而不是指数函数，Zeide 将这种关系描述为一种相当简单的形式

$$y'/y = mx^{-n} \qquad (m,\ n>0) \qquad (1\text{-}23)$$

指数$-n(n>0)$为负值表明相对生长率随自变量增加而递减。将式(1-23)积分则有：$y = e^{l} \cdot \exp[m/(-n+1) \cdot x^{-n+1}]$ (l，m，n 为常数；m，$n>0$)，令 $A = e^{l}$，$b = m/(n+1)$，$c = n-1$.则该积分式就转化为 Korf 式(1-22)。Korf 方程存在一个拐点，位置为 $Ae^{-(c+1)/c}$，当 $c>0$ 即式(1-23)中 $n>1$ 时，$(c+1)/c>1$，则 $Ae^{-(c+1)/c}$ 的取值范围为(0，A/e)。李凤日根据树木生长的一般特性，引用一般自治模型（张炳根 1990)$dy/(ydx) = g(y)$，并根据 Korf 方程的微分形式假设 $g(x)$正比于$[\ln(A/y)]^{p}$，得出方程(1-24)

$$y = A\exp[-b(d-x)^{-1/(p-1)}] \qquad (1\text{-}24)$$

称其为广义 Korf 生长方程，其中，A，$b>0$；$d\geqslant 0$。进而根据 p 的不同取值情况导出二类方程：当 $p>1$，$q>0$ 时上式拐点 Ae^{-p} 范围为(0，A/e)，此时方程为 Korf-A 型方程，指出树木生长均在此区域；当 $0<p<1$ 时，拐点范围为(A/e，A)，方程为 Korf-B 型方程；当 $p = 1$ 时，拐点为 A/e，方程为 Gompertz 生长方程。

这样看来，Korf 方程(1-22)似乎较其广义形式(1-24)应用范围要小，对于这个问题可分析描述树木相对生长率与生长年龄(自变量)幂函数关系的式(1-23)。如前所述，当 $n>1$ 时，积分出的 Korf 方程拐点范围为(0，A/e)；式(1-23)中当 $n<0$ 时，Korf 方程(1-22)中 $c = n-1<-1$，从而 $0<(1+c)/c = 1/c+1<1$，这样 Korf 方程(1-22)的拐点范围为(A/e，A)；当 $n = 2$ 时，$c = 1$，方程拐点为 Ae^{-2}，方程表现为 Schumacher 生长函数；当 $n\to\infty$时，拐点为 A/e，方程表现为 Gompertz 方程。于是式(1-23)随 n 取值不同亦可表现为多种形式。最为重要的是，式(1-23)能揭示一个问题，那就是由于在自然界中，食物的缺乏和营养的不足是限制各类生物（包括树木）生长的主要因素，这样树木相对生长率大小随生长年龄的增大应为递减趋势，用幂函数表示的树木相对生长率随生长年龄变化的函数幂指数就一定应该为负值，那么，式(1-23)中 n 的取值就不能为负，树木生长曲线的拐点也就一般不出现在(A/e，A)范围。这一点从式(1-24)中就不能明显地体现出来。

1.1.2 理论生长方程的分类

以上概述了一些常用的理论生长方程，当然还有其他描述生长的理论方程，

如 Hossfeld 方程(Peschel 1938)以及 Sloboda 方程(Sloboda 1971)等。一向被看作概率密度函数的 Weibull 方程，也往往作为生长方程使用，并且与部分理论生长方程相比，该函数表现出了较高的精确度和适合度(Dolph 1991，Kimberley 1998)。

对于理论生长方程的分类，根据分类的依据及着眼点的不同存在不同的分类方式。Sweda 和 Koide(1981)认为可分为 4 类，分别是经验方程、准理论方程、特殊理论方程和一般理论方程，并指出一般理论方程最适于描述树干半径的生长；Kiviste(1988)从考察理论生长方程的积分形式出发，将生长方程分为 7 类，将生长方程按拟合精确度排序。Zeide(1993)在分析生长方程的基本结构后，将生长方程分为 LT-下降或 LTD 结构和 T-下降即 TD 结构两类情形，将 Sloboda 等生长方程看作两种结构的混合形式。LTD 结构生长方程具有更好的拟合性能。实际上，从以上对 7 种理论生长方程数学函数特性的分析可以看出，包括 Weibull 分布函数在内，树木的相对生长率表现为生长年龄的幂函数形式的生长方程有 Schumacher 方程和 Korf 方程；树木的相对生长率表现为生长年龄的指数形式的有 Gompertz 方程、Mitscherlich 方程、Logistic 方程、Bertalanffy 方程和 Richards 方程；树木的相对生长率表现为生长年龄指数形式与幂函数形式的混合形式的有 Weibull 分布函数。这样分类的结果与 Zeide 的分类结果完全相同，并且清晰，一目了然。

1.2 林分直径结构模拟与预测研究概述

随着森林经营集约化程度的提高，生产中迫切需要更加详尽的林木大小的信息。这就要利用先进的手段来研究林木群体结构，特别是林分直径结构。林木直径分布与林分的蓄积结构及功能有着密切的关系，合理的林分结构是充分发挥森林效能的基础，研究林分的直径分布可为预估林分各径级的株数和蓄积变化、测定林木生长量、估算林分材种出材量、确定合理经营周期、林木枯损量计算以及抚育间伐设计提供科学依据。了解了林分的直径结构，也就对林分的整体生长态势有了比较详尽的掌握，对单木生长以及林分竞争所产生的结果有了清楚的认识，探讨林分直径结构动态变化规律更是有利于揭示林分发展的实质。

林分直径结构模拟与预测模型属二类模型，具有林分生长模型(一类)以及单木生长模型(三类)所不具备的功能及优特点，是研究林分直径结构的重要手段。随着计算机在林业上的应用以及统计分析科学的发展，林分直径结构模型朝着复杂化、多样化方向发展，模型参数求解从手描图解法发展到计算机寻优，从而从整体上提升了林分直径结构模拟与预测系统的性能及准确度，为科学营林和准确预估材积提供了翔实的数字依据。

1.2.1 林分直径结构模型研究进展

林分直径结构模型历来是国内外林学家关注和研究的重点。从研究的对象来说，现实林分可划分为两大类，即同龄纯林和异龄混交林，两种林分总体特征上有着明显不同，因此，所适用的林分直径结构模型亦存在较大差异。一般来讲，在研究异龄混交林分的直径结构规律时，可将复杂林分划分成若干森林分子进行调查研究。从采用的研究方法来看，对于林分直径结构模型的研究，大体上可分为参数法(parametric approach)和非参数法(nonparametric approach)两种，具体而言包括相对直径法、概率密度函数法、理论方程法、联立方程组法(percentile prediction method)、最相似回归法(*k*-nearest neighbor estimation method)以及其他拟合方法等。从目前的研究情况来看，以参数法为主导。下面就这些方法做简要的阐述。

1.2.1.1 相对直径法

相对直径法是指以林分各径阶上、下限值与林分平均直径的比值所求的相对直径值为横坐标，以各径阶上限的株数累积百分数为纵坐标做图的方法。采用该方法便于不同平均直径、不同株数的林分在同一尺度上进行比较，并能在一定程度上反映各单株在林分中的相对竞争力的大小。根据所绘制的曲线，只要已知林分中任一林木的直径，即可求出小于这一直径的林木占林分总株数的百分数。有资料表明，不论树种、年龄、密度和立地条件如何，林分平均直径(D_g)在株数累积分布曲线上的位置大致在 55%~64%，一般近于 60%。相对直径法对于现实林分直径分布状况能给出合理有效的描述，但对未知林分的直径分布就不能给予准确的评估，对林分直径的动态分布也不能给出科学的预测。

1.2.1.2 概率密度函数法

从 20 世纪 60 年代至今，所采用的概率密度函数主要有正态分布、对数正态分布、β 分布、Γ 分布、Weibull 分布、S_B 分布及综合Γ 分布。其中正态分布、β 分布以及 Weibull 分布应用较多。

对于林分直径结构的一般规律而言，尽管林分平均直径不同，但都是形成一条以林分算术平均直径($\bar{d}$)为峰点、中等大小的林木株数占多数、林木株数向两端径阶逐渐减小的近似于对称的山状曲线，这条曲线近似于正态分布曲线，也正因为此，该分布是较早用来描述林分直径结构的函数。Bailey (1980)、寇文正(1982)等均用正态分布拟合不同树种的直径分布，效果较好。但正态分布只有两个参数，分布曲线变化小，只能拟合林分发育过程中某一阶段的直径分布，具有一定的局限性。虽然如此，该分布作为经典的、一种理想状态下的林分直径分布在林分直径结构模型研究领域具有重要的意义，分布函数表达式如下所示

$$f(x)=1/(\sqrt{2\pi}\cdot\sigma)\exp[-(x-\bar{x})^2/(2\sigma^2)]$$

其中，x 和 $\bar{x}$ 分别为直径实测值与平均值，σ为直径 x 的标准差。

在正态分布函数的基础上，Meyer(1930)最早提出并应用对数正态分布研究花旗松林林分直径分布。β分布是由 Levacovi(1935)首次用来描述直径分布，之后，Clutter 等(1965)以及 Lenhart 等(1972)先后分别用该分布来描述湿地松人工林和火炬松的直径分布。β分布具有很大的灵活性，可拟合同龄林和异龄林的直径分布。寇文正(1982)指出，单纯同龄林林分和大地域的直径分布，无论理论分析还是实际拟合，β分布均表现出很高的适应性。但β分布存在一个主要的缺点，就是在闭区间内，β分布的累积分布函数不存在，因此，各径阶的株数比例就不得不采用数值积分技术来获得，并且该分布参数的生物学意义不甚明显，从而限制了β分布的应用。Nelson(1964)首次把Γ 分布作为直径分布模型应用在林业上。Bailey 和 Dell(1973)提出用 Weibull 分布拟合直径分布。Hafley 等(1977)通过研究后建议采用 S_B 分布来描述林木直径分布。随后，Bailey(1980)在推导单木生长模型时提出了综合Γ分布，综合Γ分布在表达式上比 Weibull 分布多出一项，因此更加灵活，能成功地应用于模拟林分直径结构。

在所有的概率密度函数中，Weibull 概率密度函数因其具有足够的灵活性、参数容易求解和预估、参数的生物学意义明显以及在闭区间内存在累积分布函数且形式简洁明了等优点，引起众多研究者的重视并取得了广泛的应用。例如，Smalley 和 Bailey(1974)、John R.Brooks 等(1992)以及 Lee(2001)对火炬松的研究；Smalley 和 Bailey(1974)对短叶松的研究；Campos(1981)对展松的研究；木梨谦吉等(1977)对日本柳杉的研究；孟宪宇(1988)、王振亮(1994)、李久先(1996)、周国模(1996)、R. N.James(1998)、杨凯(1999)、李荣伟(2000)和王艳洁(2001)等分别对油松、兴安落叶松、刺槐、红桧、杉木、辐射松、云杉、杜仲及栎树等树种的直径分布的研究。以上研究均取得了较好的效果。在概率密度函数范围内，Weibull 函数表现出了极大的优越性，尤其是进入 20 世纪 90 年代以后，更是占据统治地位。与部分理论方程相比、该函数也表现出较高的精确度和适合度(Dolph 1991，Kimberley 1998)。3 参数 Weibull 分布函数形式为

$$f(x)=1-\exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^{c}\right] \qquad (a\geqslant 0;\ b,\ c>0) \qquad (1\text{-}25)$$

式中，a 为位置参数，b 为尺度参数，c 为形状参数。其曲线形状随 c 值不同而变化。一般，c 取 1~1.3 之间的值。当 $c<1$ 时，为反“J”形分布函数；当 $c=1$ 时，为指数分布；当 $c=2$ 时，为 x^2 分布；当 $c=3.6$ 时，近似正态分布；当 $c>3.6$ 时，分布曲线由正偏逐渐移向左偏；当 $c\to\infty$ 时，为单点分布。因此，Weibull 分布函数既能较好地拟合不同偏度、峰度的单峰山状曲线，又能拟合反“J”形递减曲线。

1.2.1.3　*理论方程法*

理论方程是指在生物生长模型研究中，根据生物学原理做出某种假设，建立

有关生物体大小的微分方程，解出并代入其初始条件或边界条件而导出的模型。理论方程具有逻辑性强、方程参数可做出合理的生物学解释以及可移植性强等特点。在林分生长模型研究领域，理论方程主要用于构建全林分及单木生长模型，直到 20 世纪 90 年代中期以后，其在研建林分径阶分布模型上的优越性才日渐显露，且以国内的应用研究为主。目前应用的理论方程主要包括种群动态模型(如 Logistic)以及 Richards 等一般理论生长方程两种。

Ishikawa(1998)鉴于 Richards 方程的灵活性，曾采用该方程来描述林木直径分布，并给出了该方程的概率密度函数形式，但未能提出该方程应用在直径分布领域的理论基础。段爱国(2002)在分析理论方程的发展来源及数学解析性时，发现 Gompertz、Logistic、Richards、Weibull、Mitscherlich 和 Korf 等“S”形或近似“S”形的方程在一定假设条件下均可用于林分直径分布的模拟(在这里，Weibull 分布函数被看作一种理论方程)，从而拓展了理论方程的应用领域，也为其他“S”形方程在直径分布领域的应用扫清了障碍。此 6 种方程之数学表达式及方程微分形式之组合因子详见表 1-1。理论方程应用于林分直径结构的模拟主要源于以下 2 点：

1) 各方程的渐近线的存在及良好的单调性使其具备了对林分直径累积分布进行模拟的数学基础。利用累加生成、标准化数据处理方法将林分直径的原始数据化成[0，1]区间的数列，这样，具体应用时，在上渐近值均定为 1 后，各方程从经验方面即可对林分直径累积百分比分布进行有效模拟。

2) 据自然界种群生长变化量与环境营养空间的辩证关系，即种群数量愈大，占有的环境物质空间愈多，愈有利于种群的发展，而任何环境所能提供的物质空间都是有限的，故种群的发展受到最大环境容纳量的限制。考察直径的累积频率 y，可将直径累积频率的增长比做自然界中种群的发展，于是，即可设直径累积频率的增长量(dy/dx)正相关于累积频率并且受到最大累积频率的限制，则各理论方程微分式可以写成

$$dy/dx = rf(y) \cdot g(y)$$

其中，r 为各方程参数的数学组合，可理解为各方程的内禀生长率，$f(y)$与 y 成正相关，$g(y)$受 y 上渐近值的约束，与 y 成负相关。各方程的 r、$f(y)$、$g(y)$项如表 1-1 所示。

分析表 1-1 可知，Logistic、Mitscherlich 和 Weibull 方程的 $g(y)$所反映的环境中营养物质对种群增殖率的限制是一种线性的关系，Gompertz、Richards 和 Korf 三方程则表现为非线性的限制关系。于是，理论方程在林分直径结构方面的应用就具备了经验上及理论上的依据。

对理论方程模拟林分直径分布时的精度差异及产生差异的实质原因，张建国等(2003)以杉木人工林为研究对象，从方程拐点的角度进行了探索，指出方程拐点

浮动与否、浮动范围以及固定拐点所在位置对方程模拟精度具有实质性的影响。

表 1-1　6 种理论方程的数学表达式及各方程微分形式之组合因子

Table 1-1　The mathematical formulas of six kinds of theoretical equations and composite factors of their differential forms

方程名称	方程表达式	参数取值范围	方程微分形式之组合因子		
			r	$f(y)$	$g(y)$
Gompertz	$y=k\exp(-e^{a-bx})$	k，$b>0$	b	y	$\ln k-\ln y$
Mitscherlich	$y=A(1-le^{-mx})$	A，$m>0$，$0<l\leqslant 1$	m	1	$A-y$
Logistic	$y=\dfrac{C}{1+e^{p-qx}}$	C，$q>0$	q	y	$1-\dfrac{y}{C}$
Richards	$y=A(1-be^{-kx})^{\frac{1}{1-m}}$	A，k，$m>0$	$\dfrac{k}{1-m}$	y	$\dfrac{1}{1/[1-(y/A)^{1-m}]-1}$
Korf	$y=Ae^{-b\cdot\frac{1}{x^c}}$	A，b，$c>0$	$b^{-\frac{1}{c}}(c+2)$	y	$(\ln A-\ln y)^{\frac{c+1}{c}}$
Weibull	$y=A\left\{1-\exp\left[-\left(\dfrac{x}{b}\right)^c\right]\right\}$*	A，b，$c>0$	$\dfrac{Ac}{b}$	$[\ln A-\ln(A-y)]^{\frac{c-1}{c}}$	$1-\dfrac{y}{A}$

* Weibull 方程表达式为 2 参数 Weibull 分布函数。

The expression of Weibull equation is two-parameter Weibull distribution function.

1.2.1.4　联立方程组法(percentile prediction method)

Borders(1987) 提出了一种不依赖于任何预先确定函数的预测方法(distribution-free method)，该方法假定相邻百分位间的株数分布为均匀分布，采用 12 个不同累积株数百分数处直径的预测方程所组成的方程系统(即联立方程)来描述直径的分布规律。该方法被认为对多相性林分，特别是受自然灾害(如病虫害)、人为干扰(如抚育间伐)以及一些表现为双峰的纯林或混交林林分具有较好的模拟效果(Borders et al.　1990)。孟宪宇(1995)列出了该方法的基本求算过程，并采用相邻百分位处的直径、林分平均直径、地位指数、每公顷林木株数、林分年龄等林分特征因子建立了落叶松人工林林分 13 个不同百分位处直径的预估方程组，进而求算出 87 块林分的直径分布序列，χ^2 检验结果表明接受率为 76%，略高于 3 参数 Weibull 分布函数的 72.4%。Maltamo 等(2000)采用一个方栓函数(spline function)来描述相邻百分位点间的林木分布状况，林分特征值选用直径中位数、断面积直径中值以及一个哑变量，其中哑变量用来描述林分是否疏伐。Kangas(2000)曾将一种标准化的方法应用于联立方程组法，并取得了较单独采用联立方程组法要好的效果。该方法可从 2 个方面加以完善：①选用能精确预估各百分位处直径的模拟方程(如非线性方程)及准确反映林分直径结构的特征因子；②相邻百分位点间选择合适的分布函数。虽然联立方程组法具有许多优点，但其不足之处在于需要较多的林分直径结构特征的信息以及联立方程求解过程较为繁琐且彼此间的误差项存

在累加性。

1.2.1.5 最相似回归法(k-nearest neighbor estimation method)

最相似回归法是一种不依赖于任何分布函数、基于 k 个最相似实测林分分布的权重平均的非参数预测法。利用该方法对未知林分直径分布进行预测主要需要解决 3 个方面的问题：①选用适当距离函数，确定最相邻林分及林分个数；②确定所筛选出最相邻林分的直径分布；③确定权重函数，对各参照(最相邻)林分给出合适的权重值。

Maltamo(1998)经过对几种距离函数的比较分析后，发现如下绝对差异函数为最佳

$$\mathrm{d}_{ij}=\sum_{l=1}^{p}c_l\left|(x_{il}-x_{jl})\right|$$

式中，d_{ij} 表示参照林分 i 与目标林分 j 之间的距离，$l=1, \cdots, p$，p 表示林分变量的个数，c_l 为距离函数的系数，其值可采用函数比较法予以确定(Gill et al. 1981)。x_{il}、x_{jl} 为一些通常所测量的林分特征变量，如林分年龄、断面积、断面积直径中值、林分平均高等。这些特征变量在应用到距离函数之前须做标准化处理，以使其单位不致影响所求算的距离结果。

虽然，绝对差异函数所描述的距离较平方偏差法更稳定，但其他形式的距离函数亦在可选范围之内(Tokola et al. 1996)。

Maltamo 为参照林分所选用的权重函数以距离的倒数为基础，表达式为

$$w_{ij}=\left(\frac{1}{1+d_{ij}}\right)^{pm}\Bigg/\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{1}{1+d_{ij}}\right)^{pm}$$

式中，权重值 w_{ij} 表示第 i 个林分相对第 j 个目标林分的权重，w_{ij} 的总和等于 1，当针对某一个目标林分时，j 值不变，仅 i 值变动，且 $i\neq j$；权重参数 pm 决定最相邻林分权重随距离 d_{ij} 下降的快慢，在寻求参数 pm 的最优值时，pm 被允许的变动范围为 $1\leqslant pm\leqslant 5$，参照林分的数目 i 的取值范围为 $1\leqslant i\leqslant 15$。距离函数以及权重参数 pm 的效果可通过交叉检验法比较获得，所谓交叉检验法即指每一个林分都由不包括其本身在内的其他林分估计得到的一种检验方法。

Maltamo 所描述的直径分布为断面积直径分布，其给出的目标林分每单位面积的断面积直径分布计算式为

$$\hat{z}_j'=G_j\sum_{i=1}^{k}w_{ij}z_i$$

式中，$\hat{z}_j'$ 指每单位面积的断面积直径分布，z_i 为各参照林分断面积直径分布相对

自身断面积的比值，w_{ij} 如前权重函数式所示，k 指所采用的参照林分数目，G_j 表示目标林分 j 的断面积。

从统计学的角度来讲，最相似回归法具有很强的灵活性，对双峰或多峰分布有着更强的适应性，不失为一条解决复杂分布问题的新思路。但该方法需要合适的参照材料，且当研究大范围的林分资料时，最相邻参照林分的选用过程耗时较多，并且对相关软件的依赖较大。Haara 等(1997)发现，在大多数研究例子中，基于 Weibull 的分布方法较最相似回归法具有更高的精度。鉴于概率分布函数等参数法及非参数法(如最相似回归法)优特点的互补性，Maltamo(1998)将最相似回归法与 Weibull 方程结合起来研究直径分布问题，取得了较单一方法更理想的效果。

1.2.1.6　*其他拟合方法*

随着相关学科的发展以及对模型适应性需求的提高，林木直径分布模拟预测模型正呈多样化发展趋势。邓聚龙(1987)提出了灰色系统模型的概念，由于该模型可在原始数据较少的情形下，通过累加生成或相减生成法能够充分有效地利用灰色信息，故灰色模型在林木生长及分布领域得到较好的应用。该系统可分为 GM(1，1)、GM(1，n)和 GM(2，1)等 3 种，其中 GM(1，1)应用最为广泛。马胜利(1999)应用 GM(1，1)模型研究了纯林及天然异龄林的直径分布情况，认为该模型较β分布及抛物线分布效果要好。对于混交林分，Maltamo(1997)曾利用 Weibull 分布进行过描述，发现 Weibull 函数对林分内单一树种以及多树种整体直径分布均具有较好的模拟性能。但有研究 (Tham　1988) 表明，当混交林分表现为双峰或多峰状态时，无论是 S_B 分布还是 Weibull 分布都不能给予精确的描述。Titterington (1997)介绍了一种被称为有限混合分布的研究方法，Liu (2002)采用 2 参数 Weibull 分布建立的有限混合分布模型研究了混合树种所组成林分的直径分布。对于林分直径结构模拟预测模型的研究，本文不能一以概之，仅列出当前具有代表性的典型研究工作。

1.2.2　模型参数求解及预测方法

采用参数法对林分直径分布进行模拟与预测时，其内容可以分为对已知林分分布参数的求解和对未知林分分布参数的预估两部分。模型参数的求解及预估方法至关重要，对模拟精度与预测效果具有较大的影响作用。如分布参数的求解和预估是分步进行的，则参数求解精度的高低将直接影响预估的效果。参数的预估方法包括参数预测法(PPM)和参数回收法(PRM)。参数的求解方法包括最大似然法、矩法、百分位法、回归法、遗传算法、BP 模型等，其中，最常用的为前面 4 种，而最大似然法、回归法、遗传算法和 BP 模型主要解决已知林分分布参数的求解问题。如要实现预估还需采用 PPM 或 PRM，而矩法以及百分位法在求解已知林分分布参数的同时，可以达到预估的目的。

Bailey(1973)认为最大似然法是一种非常精确的参数求解方法，但需用迭代法

进行求算。对于几乎所有的概率密度函数来说，矩法不失为一种普适性的求解方法(李凤日 1986)。孟宪宇(1996)、邱水文(1991)曾对此 2 种方法的具体应用分别做过较为详细的论述。百分位法是一种简洁实用的近似求算方法，该方法正日益受到研究者的重视。随着数理统计软件的发展，回归法，尤其是非线性回归法也正体现出其本身的优越性。限于篇幅及研究现状，为了较好地阐明各方法彼此间存在的区别与联系，本文以 Weibull 分布函数为例，对矩法、百分位法及回归法的应用做简要概述。

1.2.2.1 基于矩法的参数预测体系

矩法是利用矩估计技术求出分布参数的方法。如 Weibull 分布函数，函数表达式见式(1-25)，其一阶原点矩即数学期望 $E(x)$可由林分的算术平均直径 $\bar{x}$ 加以估计，而二阶原点矩可由林分的平方平均直径 $\bar{x}^2$ 加以估计。

$$\bar{x} = \int_0^\infty xf(x,a,b,c)\mathrm{d}x = a + b\Gamma(1+1/c) \tag{1-26}$$

$$\bar{x}^2 = \int_0^\infty x^2 f(x,a,b,c)\mathrm{d}x = b^2\Gamma(1+2/c) + 2ab\Gamma(1+1/c) + a^2 \tag{1-27}$$

式中，Γ 表示伽马函数。

通常，当采用矩估计方法时，位置参数 a 被设定为林分最小径阶的下限值或最小直径的某个指定倍数，将已知林分 $\bar{x}$ 和 $\bar{x}^2$ 的值代入以上 2 式，联立公式(1-26)、式(1-27)求解，就可得到相应的参数值。假定未知林分直径分布符合 Weibull 分布，则只要已知或通过一类模型得出 $\bar{x}$ 、$\bar{x}^2$ 的值，应用式(1-26)、式(1-27)即可实现对未知林分直径分布的预测。矩法的优点为不依赖于现实林分即可直接对未知林分直径分布做出预测，但其缺点也在于此，因为往往事先无法预知某一树种、某一林分直径符合何种分布，即假设的前提条件很难确定，因此，应用该方法会导致未知林分直径分布的趋同化。

1.2.2.2 基于百分位法的参数预测体系

百分位法可以应用于概率密度函数以及理论方程参数的求解。Weibull 参数回收方法最早由 Da Silva(1986)提出，随后，Bailey 等(1989)、Brooks 等(1992)和 Lee(2001)发展性地应用了这一方法，该回收方法正是基于百分位法。百分位法主要由两部分组成：①建立分布函数参数与各百分位点直径的关联方程；②建立各百分位点直径与林分因子的联立方程。Bailey(1989)选用的百分位点为 0、25%、50%、95%，给出的各参数估计方程为

$$a = (n^{1/3}D_0 - D_{50})/(n^{1/3} - 1) \tag{1-28}$$

$$c = In\left[\frac{In(1-0.95)}{In(1-0.25)}\right] \Big/ In\left(\frac{D_{95}-a}{D_{25}-a}\right) \tag{1-29}$$

$$b = -\frac{a\Gamma_1}{\Gamma_2} + \sqrt{\left(\frac{a}{\Gamma_2}\right)^2 (\Gamma_1^2 - \Gamma_2) + \frac{D_g^2}{\Gamma_2}} \tag{1-30}$$

式(1-30)中，$\Gamma_1=\Gamma(1+1/c)$，$\Gamma_2=\Gamma(1+2/c)$。以上 3 式中，D_0 指林分最小胸高直径，n 为林分株数，D_g^2 为林分平方平均直径，D_{25}、D_{50}、D_{95} 分别指百分位点 25%、50%、95%处所对应的直径。

式(1-28)是假定 D_0 符合一个近似的 Weibull 分布，并指定参数 $c = 3$ 的情形下，结合百分位点 D_{50} 的求解方程而得到；联立百分位点 25%和 95%的 Weibull 方程可得出式(1-29)；利用矩法所得到的式(1-27)对参数 b 进行求解，即可推导出式(1-30)。各百分位点直径的求解方程可由如下式(1-31)做出估计。

$$D_i = f(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n) \tag{1-31}$$

式中，D_i 表示各百分位点处的直径，x_1, x_2, x_3, …, x_n 代表参与预估的林分因子。Brooks(1992)为提高估计精度，对百分位点 D_0 和 D_{50} 的估计采用式(1-31)，并采用如下式(1-32)估计 D_{25}、D_{95}。

$$D_i = f(D_{50}, x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n) \tag{1-32}$$

采用 3 参数 Weibull 分布函数预估林分直径分布时，位置参数 a 的估计精度直接影响着估计效果，百分位法的一大优点就是采用 2 个百分位点直径的估计方程对 a 进行求算，较好地解决了这一问题。

1.2.2.3　基于回归法的参数预测体系

回归分析法是处理一个变量与其他变量的函数关系的方法。回归法是求解理论方程等分布函数的参数的理想方法。基于该方法的参数预测体系主要由 3 部分组成：①利用线性或非线性回归法对分布函数做最优化数据拟合，直接得到参数值；②借助分布曲线上的关键点建立模型参数的回收方程；③建立分布曲线上关键点处的直径与林分因子间的关联方程。惠刚盈(1995)、吴承祯(1998)分别对 Logistic 和 Gompertz 方程采用回归法进行参数求解，并对杉木人工林直径分布进行预测，取得较好的效果。

首先采用线性或非线性回归法求解出理论方程或具有累积分布形式的概率密度函数的参数值。一旦模型参数确定，即可选定与参数个数相等的关键点个数，并将各点坐标代入所采用的模型建立如下的函数关系式

$$F_i = f(a_1, a_2, a_3, \cdots, a_n, D_i) \tag{1-33}$$

式中，F_i为关键点的累积频率，$a_1, a_2, a_3, \cdots, a_n$ 指代模型的参数，n 为参数个数，D_i指第 i 关键点对应的直径。对包含 3 个参数以内的“S”形分布曲线，一般关键点 F_i取值为 0.333、0.9 以及方程拐点的纵坐标。

对于 3 参数 Weibull 方程而言，参数回收方程形式如下

$$0.333 = 1 - \exp\{-[(D_{0.333} - a)/b]^c\} \tag{1-34}$$

$$0.9 = 1 - \exp\{-[(D_{0.9} - a)/b]^c\} \tag{1-35}$$

$$D_{\mathrm{I}} = b(1 - 1/c)^{1/c} + a \tag{1-36}$$

式(1-36)中，D_{I}表示分布曲线拐点处所对应的直径。经过曲线拟合得到已知林分分布参数值，根据以上 3 式即可求出各关键点所对应的直径。反之，如已知 $D_{0.333}$、D_{I}和 $D_{0.9}$的值，联立方程(1-34)、(1-35)和(1-36)就可求出参数 a，b，c。分布曲线各关键点处的直径与林分因子的关联方程可采用如下算式表示

$$D_i = f(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n) \tag{1-37}$$

式中，D_i表示各关键点处的直径，$x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$ 代表参与预估的林分因子。

通常采用的方程为幂函数形式，见如下式(1-38)

$$D_i = mD_{\mathrm{g}}^n \tag{1-38}$$

式中，m，n 为待估参数，D_{g}为林分平均直径。

这样，利用式(1-34)、式(1-35)、式(1-36)求出各关键点所对应的直径，建立其与林分因子间如同式(1-37)的回归关系，从而形成一个完整的预测体系，如果已知未知林分的相关因子，应用这一体系，即可实现对未知林分直径分布的预测。

在对已知林分数据进行拟合时，不同的统计软件以及不同的拟合方法的模拟精度不完全相同。SAS 统计分析软件之非线性回归法以残差平方和最小为目标，通过有限次迭代寻求模型参数的最优解，不失为一种较好的参数求解方法，其中，Dud 法以及 Marquardt 法各有其优特点，可视具体情况选择使用。

从上面对矩法、百分位法、回归法的介绍可以看到，这些方法彼此间存在一定的联系，如百分位法参数的求解过程应用了矩法，而回归法中采用的关键点与百分位法的百分位点有着异曲同工之处。当然，这些方法还可以彼此联合，形成新的模拟预估体系。

1.2.3 林分直径结构模拟与预测研究存在的问题及建议

林分直径结构模拟与预测的研究工作已经取得了很大的进展，但鉴于该研究在材种测算、经营措施、森林更新以及林木枯损等方面的巨大价值和应用前景，

本项研究尚需得到林学家的进一步重视。总地看来，林分直径结构模拟与预测领域的研究还存在许多重要的问题尚未解决，建议今后一个时期的研究工作从以下几个方面展开。

1) 同时开展参数法、非参数法以及依赖于分布函数、不依赖于分布函数的模拟预测方法的研究工作，开拓思路，寻求描述林分直径分布的最佳方法。

2) 寻找最能反映直径分布规律的林分特征因子，并建立特征因子与分布参数的最佳函数关系。

3) 解决当前研究中存在的模拟与预测脱节的问题，在对已知林分进行模拟时，就要考虑所建立起来的模拟预测体系的适用范畴，因为，采用所建立的模型进行预估时，往往对一部分未知林分预测效果较好，而对另一部分未知林分预测精度较低，这样还是未能解决好预估的问题。除探讨最相似回归法与分布函数相结合进行预估的方法外，亦可考虑对林分进行分类(如按不同密度)建模的思路。

4) 以上 3 点均为横向性研究，除此，亦应加强林分直径分布领域的纵向性研究，如研究直径分布与材积分布、断面积分布间的关系等。

参 考 文 献

奥尔德 D. 1980. 森林材积估测和收获预估(卷 2——收获预估).联合国粮食及农业组织，47

崔启武，Lawson. 1982. 一个新的种群增长数学模型——对经典的 Logistic 方程和指数方程的扩充. 生态学报

邓聚龙. 1987. 灰色预测与决策. 华中工学院出版社

段爱国，张建国，童书振. 2003. 6 种生长方程在杉木人工林林分直径结构上的应用. 林业科学研究，16(4)：423~429

段爱国. 2002. 杉木人工林林分直径结构模拟及其动态变化规律的研究. 硕士学位论文. 中国林业科学研究院

惠刚盈，盛炜彤. 1995. 林分直径结构模型的研究. 林业科学研究，2：127~131

寇文正. 1982. 林木直径分布的研究. 南京林产工业学院学报，1：51~65

李凤日. 1986. 林木直径分布的研究(综述). 林业译丛，4：12~18

李凤日. 1987. 兴安落叶松天然林直径分布及产量预测模型的研究. 东北林业大学学报，4：8~16

李凤日. 1996. 落叶松人工林林分生长与收获模型. 博士学位论文. 北京林业大学

李凤日等. 1993. Richards 函数与 Schnute 生长模型的比较. 东北林业大学学报，4：15~24

李久先. 1996. 三种生长模式在红桧人工林生长适用性之探讨. 中华林学季刊，2: 3~14

李荣伟，唐志刚. 2000. 杜仲人工林林分直径分布研究. 四川林业科技，21(2)：1~6

李文灿. 1990. 对 Logistic 方程的再认识. 北京林业大学学报，2：121~127

马胜利. 1999. 灰色模型在林木直径分布规律研究中的应用. 林业资源管理，3：75~78

孟宪宇，岳德鹏. 1995. 利用联立方程测算林分直径分布的初步研究. 林业资源管理，6：39~43

孟宪宇. 1988. 使用 Weibull 函数对树高分布和直径分布的研究. 北京林学院学报，10(1)：40~48

孟宪宇. 1996. 测树学. 第 2 版. 北京：中国林业出版社

木梨谦吉，西泽正久等. 1985. 对林分模拟的生长模型的研究. 李炳铁译. 林业资源管理译丛,

1：83~110
邱水文. 1991. 林木直径分布收获模型综述. 华东森林经理，5(2)：28~32
盛炜彤. 1996. 杉木建筑材优化栽培模式研究总报告. 见：杉木建筑材优化栽培模式研究专题. 世界林业研究，9(专集)：32~53
唐守正. 1991. 广西大青山马尾松全林分整体生长模型及其应用. 林业科学研究(增刊), 8~21
王冬梅. 1987. Richards 生长函数在天然落叶松林分中应用的研究. 北京林业大学硕士学位论文，111
王艳洁，腾启和等. 2001. 河北省承德地区天然次生栎林直径分布的研究. 林业资源管理，1：45~50
王振亮，毕君等. 1994. 太行山刺槐人工林直径分布规律的研究. 河北林业科技，3：15~18
吴承祯，洪伟. 1998. 杉木人工林直径结构模型的研究. 福建林学院学报，2：110~113
杨凯，高燕平等. 1999. 红皮云杉人工林直径结构分布模型的研究. 吉林林学院学报，15(1)：14~19
杨荣启等. 1989. 史纳德生长函数式在台湾人工林林分结构分析上的应用. 中华林学季刊，3：3~17
张大勇，赵松龄. 1985. 森林自疏过程中密度变化规律的研究.林业科学，4：369~374
张建国，段爱国. 2003. 理论生长方程对杉木人工林林分直径结构的模拟研究. 林业科学，39(6): 55~61
张少昂，王冬梅. 1992. Richards 方程的分析和一种新的树木理论生长方程. 北京林业大学学报，3：99~105
张少昂. 1986. 兴安落叶松天然林林分生长模型和可变密度收获表的研究. 东北林业大学学报，3：17~26
周国模，王瑞铨，俞双群等. 1996. 庆元县人工杉木林直径分布的研究. 华东森林经理，10(1)：18~21
Amaro A，David R. 1998. Modeling dominant height growth：eucalyptus plantations in Portugal. For Sci，1：37~46
Bailey R L. 1980. Individual tree growth derived from diameter distribution models. For Sci, 26：626~632
Bailey R L, Dell T R. 1973. Quantifying diameter distribution with the Weibull function. For Sci, 19：97~104
Bailey R L，Burgan T M, Jokela E J. 1989. Fertilized midrotation-aged slash pine plantations stand structure and yield prediction models. Southern Journal of Applied Forestry, 13：76~80
Bertalanffy L V. 1957. Quantitative laws in metabolism and growth. Quart Rev Biol, 32：217~231
Borders B E, Patterson W D. 1990. Projecting stand tables：a comparison of the Weibull diameter distribution method，a percentile-based projection method，and a basal area growth projection method. For Sci, 36：413~424
Borders B E，Surter R A，Bailey R L et al. 1987. Percentile-based distributions characterize forest stand tables. For Sci, 33：570~576
Bredenksmp B V, Gregoire T C. 1988. A forestry application of Schute's generalized growth function. Forest Sci，1：26

Brooks J R, Borders B E. 1992. Predicting diameter distributions for site-prepared loblolly and slash pine plantations. South J Appl For, 16(3): 130~133

Campos J C C. 1981. Diameter distribution yield tables and their application to compare levels of thinning practices. Proceedings. XVII IUFRO World Congress, Kyoto, Japan, P13~24

Da Silva J A. 1986. Dynamics of stand structure in fertilized slash pine plantations. Ph D diss, Univ of GA

Davis L S, Johnson K N. 1987. Forest Management. 3rd ed. New York: McGraw-Hill

Dolph K L. 1991. Polymorphic site index curves for red fir in California and southern Oregon. USDA For Serv Res. Pap. PSW-206, 18

Duan A G, Zhang J G, Tong S Z. 2003. Application of six growth equations on stands diameter structure of Chinese fir Plantation. Forest Research, 16: 423~429

Gill P E, Murray W, Wright M H. 1981. Practical optimization. London: Academic Press Limited

Gompertz B. 1825. On the nature of the function expressive of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. Phil Transac Roy Soci. London, 115: 513~585

Haara A, Maltamo M and Tokola T. 1997. The *k*-nearest-neighbour method for estimating basal-area diameter distribution. Scand J For Res. 12: 200~208

Hyink D M, Moser J W. 1983. A generalized framework for projecting forest yield and stand structure using diameter distributions. For Sci, 29: 85~95

Ishikawa Y. 1998. Analysis of the diameter distribution using the Richards distribution function (III). *In*: Relationship between mean diameter or diameter variance and parameter *m* or *k* of uniform and even-aged stands. J Plann, 31: 15~18

James R N. 1998. Evaluation of diameter distribution as a criterion for selecting crop trees in pulpwood regime. New Zealand Journal of Forestry Science, 28(2): 195~201

Kangas A, Maltamo M. 2000. Calibrating predicted diameter distribution with additional information. For Sci, 46(3): 390~396

Kiviste A K. 1988. Mathematical functions of forest growth. Tartu (In Russion): Estonian Agricultural Academy

Lee S H. 1999. Developing and comparing site index curves using polymorphic and anamorphic equations for Douglas fir. Jour Korean For Soc. 2: 142~148

Lee Y J, Hong S H. 2001. Weibull diameter distribution yield prediction system for loblolly pine plantations. Jour Korean For Soc, 90(2): 176~183

Liu C M, Zhang L J, Davis C J. 2002. A finite mixture model for characterizing the diameter distributions of mixed-species forest stands. For Sci, 48(4): 653~661

Maltamo M A, Kangas J U, Torniainen T et al. 2000. Comparison of percentile-based prediction methods and Weibull distribution in describing diameter distribution of heterogenous Scots Pine stands. For Ecol Manage, 133: 263~274

Maltamo M, Kangas A. 1998. Methods based on *k*-nearest neighbor regression in the prediction of basal area diameter distribution. Can J For Res, 28: 1107~1115

Maltamo M. 1997. Comparing basal-area diameter distributions estimated by tree species and for the entire growing stock in a mixed stand. Silva Fenn, 31: 53~65

Mark O K, Nick J L. 1998. Site index curves for pinus nigra grown in the south island high country, New Zealand. New Zealand Journal of Forestry Science, 28(3): 389~399

Mark O K. 1998. Site index curves for pinus nigra grown in the south island high country, New Zealand. New Zealand Journal of Forestry Science, 3: 389~399

Mitscherlich E A. 1919. Landwirt schaftli che jahrbucher Berlin, 53: 167~182

Pienaar L V, and Turnbull K J. 1973. The Chapman-Richards generalization of Von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. For Sci, 1: 2~22

Richards F J. 1959. A flexible growth function for empirical use. J Exp Bot, 29: 290~300

Sahoo T K, Chauhan P S. 1998. Site index curves for pinus roxburghii sergeant plantations. Indian Journal of Forestry, 3: 214~216

Schnute J. 1981. A versatile growth model with statistically stable parameters. Can J Fish Aquat Sci, 1128~1140

Schumacher F X. 1939. A new growth curve and its application to timber-yield studies. J For, 37:819~820

Smalley G W, Bailey R L. 1974. Yield tables and stand structure for loblolly pine plantations in Tennessee, Alabama, and Georgia highlands. USDA For Serv Res Pap, 57

Sweda T, Koide T. 1981. Applicability of growth equations to the growth of trees in stem radius(I) application to white spruce. J Jap For Soc, 113~124

Sweda T, Takeo U, Junici T. 1985. Applicability of growth equations to the growth of trees in stem radius(Ⅲ) accuracy of projections. J Plann, 327~331

Sweda T. 1984. Theoretical growth equations and their application in forestry. Bull Nagoya Univ For, 7: 149~260

Sweda T. 1988. A theoretical stem taper curve(Ⅱ). J Plann, 199~205

Tham A. 1988. Structure of mixed Picea abies(L.) Karst. and Betula pendula Roth and Betula pubescence Ehrh. Stands in south and middle Sweden. Scand. J. For. Res. 3: 355~370

Titterington D M. 1997. Mixture distributions(update). Encyclopedia of Statistical Sciences. 399~407

Tokola T. 1996. Point accuracy of a non-parametric method in estimation of forest characteristics with different satellite materials. Int J Remote Sens. 17: 2333~2351

Verhulst P F. 1838. Correspondence mathematique et physiques. 10: 113~121

Wright S. 1926. Book review. J Am Status Assoc, 21: 493~497

Zeide B. 1989. Accuracy of equations describing diameter growth. Can J For Res, 19: 1283~1286

Zeide B. 1993. Analysis of growth equations. For Sci, 3: 594~616

Zhang J G, Duan A G. 2003. Application of theoretical growth equations on modeling stands diameter structure of Chinese fir plantations. Forest Science

2 杉木人工林优势高生长模拟及其多形地位指数方程的研制

在一定密度范围内，优势高生长相对来说与林分密度无关，受疏伐影响微弱，鉴于此，一定时期内林分优势木的高生长量成为判定林地生产力高低的重要依据，基准年龄时不同林分的优势木平均高即形成指示各林分立地质量的一项综合指标——立地指数(刘景芳等 1996，克拉特等 1987)。立地指数作为林地生产力的一种测度虽说具有其局限性，但亦是最常用的指标(Avery et al. 1994)。优势高模型和立地指数曲线的构建在林分生长模型及经营模型系统中占有重要地位。

优势高模型类型通常根据它们所产生的自然曲线族分为两类，即同形和多形树高曲线系统(Gadow et al. 1998)，其中多形树高曲线又可分为多形相交曲线以及多形非相交曲线(Clutter 1983)。目前，对于优势高模型的构建主要采用 2 种方法：一种是直接应用理论方程的原型，许多具有渐近值和拐点的单变量函数均可用于林分优势高生长的模拟(Garcia 1997，Zeide 1993)；一种是通过变换利用理论方程的差分形式(Amaro 1998，Border et al. 1988)。后一种方法表现更为灵活，已日渐成为主流研究方法，但国内却几乎无此方法的具体应用。对于地位指数曲线的研制，通常采用以下 3 种方法：①导向曲线法(Newberry et al. 1978，Lee et al. 1999)；②差分方程法(Kalle 2002，Lee 1999，Border et al. 1984)；③参数预估法(Mark 1998)。国内研建地位指数曲线方程时采用的是①、③。例如，编制杉木全国地位指数表时应用的就是导向曲线法，选用了 Schumacher 方程(南方十四省区杉木栽培科研协作组 1982)；骆期邦等(1989)以 Richards 函数为基本模型，采用参数预估法建立了不相交多形地位指数曲线方程，并探讨了由此带来的一系列与标准年龄相关的问题；惠刚盈(1996)引进了德国生物统计学家 B. Sloboda 的树高生长模型，应用导向曲线法建立了杉木人工林地位指数曲线模型，认为用 Sloboda 方程拟合多形指数曲线，不会导致指数年龄时的树高与指数级不符的矛盾，同时能确保拐点参数的生物意义。有一点值得明确的是，当构建地位指数曲线方程时，应用导向曲线法和差分方程法均可得到单形或多形的地位指数曲线方程。一般认为，多形曲线方程较单形曲线方程能更好地模拟树高生长(Mark 1998，Devan et al. 1982)。综上所述，虽然国内外对优势高模型以及多形地位指数方程有过比较深入的探讨，但对众多的单形和多形优势高模型缺乏系统的比较研究，未能指明各树高模型拟合精度高低的实质原因，缺乏对诸多理论方程多形表达形式的深入了解和探究，无形中局限了理论方程在此方面的应用，因而影响了不同树种优势高模型及多形地位指数方程的研制。本文基于国内外几种常用的优势高

方程，采用差分方程法研建了各方程多形表达式，探讨了其作为多形优势高方程的表达机制，对各方程模拟优劣进行了较为全面具体的分析，以期为杉木及其他树种人工林优势高生长模型和地位指数方程的研建奠定良好的理论及实践基础。

2.1 材料与方法

2.1.1 材料

所用材料来源于20世纪50年代中期及80年代初在全国范围内所做的部分杉木优势木的解析木资料，所采用的标准地分布于湖南省会同县、广西壮族自治区大苗山、贵州省黎平县及福建省南平市和三元县，均属杉木中心产区，调查年度分别为1981年、1954年、1955年、1956年，所采用的解析木株数分别为31株、35株、43株、48株，共计157株。湖南省会同县标准地面积为300~500m^2，其他省均为1000m^2；福建省的解析木为插条造林，其他省均为实生苗造林。所用优势木树龄均达到或接近杉木指数年龄(20a)，生长已基本稳定。对达到或超过指数龄的优势木，直接用20a生时的树高确定立地指数级；对未达到的，则通过杉木全国地位指数表确定。由此得到上述4地所选标准地分布的立地指数级个数，分别为6、7、7、8，并将解析木资料按所在地和立地指数级进行归类处理。各标准地所在地的解析木资料详见表2-1。

表 2-1 杉木解析木资料统计表

Table 2-1 Statistical table of stem analysis data of China fir

标准地(standard site)	年龄(age)/a			树高(height)/m		
	最小(min)	最大(max)	平均(mean)	最小(min)	最大(max)	平均(mean)
湖南会同(Huitong, Hunan)	5	63	19	2.80	28.21	14.37
广西大苗山(Damiao Mountain, Guangxi)	5	43	21	2.65	27.00	17.32
贵州黎平(Liping, Guizhou)	5	46	23	2.33	27.65	16.18
福建南平、三元(Nanping, Sanyuan, Fujian)	5	36	21	3.30	30.70	15.95
总计(total)	5	63	21	2.33	30.70	15.79

2.1.2 方法

2.1.2.1 树高生长方程

选择5种理论生长方程作为模拟优势高生长过程的候选方程：Richards方程、Weibull方程、Korf方程、Logistic方程以及Schumacher方程。这些方程过去都曾被广泛地应用于树木生长的模拟，尤其以Richards方程为最(李希菲 1999，Amaro 1998，Gadow 1998，李久先 1996，Rennolls 1995)。各方程数学表达形式如表2-2所示。

表 2-2　5 种理论生长方程的数学表达形式

Table 2-2　The mathematical expressions of 5 kinds of theoretical growth equations

方程 (equation)	表达式 (expression)	拐点(inflection point)		参数 (parameter)
		横坐标(abscissa)	纵坐标(ordinate)	
Richards	$y = a[1-\exp(-bx)]^c$	$1/(b\ln c)$	$a(1-1/c)^c$	a，b>0
Weibull	$y = a[1-\exp(-bx^c)]$	$[(c-1)/bc]^{1/c}$	$a\{1-\exp[(1-c)/c]\}$	a，b，c>0
Korf	$y = a\exp(-b/x^c)$	$[(c+1)/bc]^{-1/c}$	$a\exp[(-c-1)/c]$	a，b，c>0
Logistic	$y = a/[1+\exp(b-cx)]$	b/c	$a/2$	a，c>0
Schumacher	$y = a\exp(-b/x)$	$b/2$	ae^{-2}	a，b>0

以上 5 种方程均为具有拐点和渐近线的“S”形生长方程，其中，Richards、Weibull 及 Korf 方程的拐点纵坐标为渐近值的浮动倍数，而 Logistic 和 Schumacher 方程为固定倍数。段爱国(2003)对这些方程的参数含义以及彼此间存在的复杂关系给予了解释和说明。

2.1.2.2　*差分方程*

对任一反映树高及年龄关系的方程，使用差分法总能得到其差分形式，差分方程能很好地模拟林分优势高的生长进程。拟合差分方程的数据资料可源自于固定样地、间隔样地以及采集解析木资料的临时样地。当数据为长期观测资料或解析木资料时，采用差分方程更为适宜(Amaro　1998)。本文对表 2-2 中 5 种理论生长方程做差分运算，分别得出它们的差分表达形式。以参数 b 为自由参数，保留渐近值参数 a 和形状参数 c，差分消元后得到 4 个 2 参数差分方程和 1 个 1 参数差分方程；采用差分但不消元的方式，分别得到 Richards、Weibull 函数的 3 参数差分方程；为探讨所选自由参数不同时差分方程的拟合效果，同时产生了自由参数分别为 a 和 c 时 Richards 函数的差分方程。下面以 Korf 方程为例，阐述各差分方程的基本形成过程。

选取任意两对优势高与年龄的解析木数据(t_1，H_1)及(t_2，H_2)，代入 Korf 方程，得以下 2 式

$$H_1 = a\exp(-b/t_1^c) \tag{2-1}$$

$$H_2 = a\exp(-b/t_2^c) \tag{2-2}$$

分别变形为

$$\ln H_1 - \ln a = -b/t_1^c \tag{2-3}$$

$$\ln H_2 - \ln a = -b/t_2^c \tag{2-4}$$

用式(2-4)除以式(2-3)，对 H_2 求解后即可得到 Korf 方程的差分表达式

$$H_2 = H_1^{t_1^c/t_2^c} \cdot a^{1-t_1^c/t_2^c} \tag{2-5}$$

其他方程依此类推，所得到的差分方程列表 2-3 如下。为尽量全面地介绍优良树高方程，并比较 3 参数差分方程的拟合特性，这里也列出了 Sloboda 方程的差分形式(Gadow et al. 1998)。

表 2-3 各差分方程的表达形式

Table 2-3 The expression of every difference equation

方程原型 (prototype of equation)	差分方程 (difference equation)	自由参数 (free parameter)	代码 (code)
Korf	$H_2 = H_1^{t_1^c/t_2^c} \cdot a^{1-t_1^c/t_2^c}$	b	K_c
Richards	$H_2 = a\{1-[1-(H_1/a)^{1/c}]^{t_2/t_1}\}^c$	b	R_{c_1}
	$H_2 = a\exp[\ln(H_1/a)\ln(1-e^{-bt_2})/\ln(1-e^{-bt_1})]$	c	R_{c_2}
	$H_2 = H_1\{[1-\exp(-bt_2)]/[1-\exp(-bt_1)]\}^c$	a	R_{c_3}
	$H_2 = a\{1-(1-a^{-1/c}H_1^{1/c})\exp[-b(t_2-t_1)]\}^c$		R_{c_4}
Weibull	$H_2 = a-a[(a-H_1)/a]^{t_2^c/t_1^c}$	b	W_{c_1}
	$H_2 = a+(H_1-a)\exp(-bt_2^c+bt_1^c)$		W_{c_2}
Logistic	$H_2 = a/[(a/H_1-1)\exp(ct_1-ct_2)+1]$	b	L_c
Schumacher	$H_2 = a\cdot\exp[(t_1/t_2)\ln(H_1/a)]$	b	Sch_c
Sloboda	$H_2 = a(H_1/a)^{\exp\{-b/[(c-1)t_1^{c-1}]-b/[(c-1)t_2^{c-1}]\}}$	d	S_c

设 $H = H_2$，$t = t_2$，$SI = H_1$，$T = t_1$，其中 SI、T 分别表示立地指数和指数年龄，代入表 2-3 中的所有差分方程，则可得到以各差分方程为基础的地位指数方程，见表 2-4。如 Korf 方程的地位指数方程为

$$H = SI^{T^c/t^c} \cdot a^{1-T^c/t^c}$$

表 2-4 10 种地位指数方程及其拐点表达式

Table 2-4 Ten kinds of site index equations and their expressions of inflection point

方程 (equation)	地位指数方程 (site index equation)	拐点表达式* (expression of inflection point)	代码 (code)
Korf	$H = SI^{T^c/t^c} \cdot a^{1-T^c/t^c}$	$t = T[\ln(a/SI)/(1+1/c)]^{1/c}$	K_c
Richards	$H = a\{1-[1-(SI/a)^{1/c}]^{t/T}\}^c$	$t = -T\ln(c+1)/\ln[1-(SI/a)^{1/c}]$	R_{c_1}
	$H = a\exp[\ln(SI/a)\ln(1-e^{-bt})/\ln(1-e^{-bT})]$	$t = \frac{1}{b}\ln\frac{\ln(SI/a)}{\ln[1-\exp(-bT)]}$	R_{c_2}

续表

方程 (equation)	地位指数方程 (site index equation)	拐点表达式* (expression of inflection point)	代码 (code)
	$H=\mathrm{SI}\{[1-\exp(-bt)]/[1-\exp(-bT)]\}^{c}$	$t=\ln c/b$	R_{c_3}
	$H=a\{1-(1-a^{-1/c}\mathrm{SI}^{1/c})\exp[-b(t-T)]\}^{c}$	$t=T+(1/b)\ln[c(1-a^{-1/c}\mathrm{SI}^{1/c})]$	R_{c_4}
Weibull	$H=a-a[(a-\mathrm{SI})/a]^{t^c/T^c}$	$t=T[(1/c-1)/\ln(1-\mathrm{SI}/a)]^{1/c}$	W_{c_1}
	$H=a+(\mathrm{SI}-a)\exp(-bt^{c}+bT^{c})$	$t=[(c-1)/(bc)]^{1/c}$	W_{c_2}
Logistic	$H=a/[(a/\mathrm{SI}-1)\exp(cT-ct)+1]$	$t=T+(1/c)\ln(a/\mathrm{SI}-1)$	L_c
Schumacher	$H=a\exp[(T/t)\ln(\mathrm{SI}/a)]$	$t=-T\ln(\mathrm{SI}/a)/2$	Sch_c
Sloboda	$H=a(\mathrm{SI}/a)^{\exp[-c/[(d-1)T^{d-1}]+c/[(d-1)t^{d-1}]]}$	$c\ln\frac{\mathrm{SI}}{a}\exp\left[m+\frac{c}{(d-1)t^{d-1}}\right]+dt^{d-1}+c=0$	S_c

* 拐点表达式为拐点的横坐标。

The expression of inflection point is the abscissa of inflection point.

通过上式即可得到不同地位指数（如 16、18、20）时的优势高生长曲线，同样当已知优势高(H)及树龄(t)时，亦可由上式求出相应的立地指数。

2.1.2.3　多形地位指数方程

基于理论生长方程原型，采用差分法研制地位指数方程时，由于所选择的自由参数或者运算方式不同，所得到的地位指数方程就可能会产生单形与多形之分。由单形方程所产生的树高曲线族中，各生长曲线的形状独立于立地指数，与环境因子无关；而由多形方程所得到的树高曲线族中，各生长曲线的形状与立地指数相关。多形树高模型能说明和描述一个立地指数决定一条树高曲线的现象，具有良好的说理性。对于杉木人工林多形地位指数方程的构建，过去常采用 2 种方法：一种是参数预估法，即将方程中的参数全部或部分地表达为立地指数的函数，这种方法的优点为比较清晰地表达了方程的多形含义，但往往存在标准年龄时树高与指数值不一致以及在优势高和树龄已知时立地指数不易给出的问题，这无疑动摇了多形方程说理性的优势；另一种是导向曲线法，就是直接应用具有多形含义的理论生长方程，目前研究较多的 Sloboda 方程即属此类，但缺乏对其他常用理论生长方程多形表达方式的探讨。基于寻求诸多理论方程多形表达方式的目的，本文采用差分法得到表 2-3 中的 10 种差分方程，并着眼于各差分方程的拐点取值情形，探讨了这 10 种方程的单形或多形内涵。表 2-4 列出了 10 种相应的地位指数方程及其拐点表达式。

对于表 2-4 中所有地位指数方程，若 $t=T$，则有 $y=\mathrm{SI}$。这意味着由差分法所得到的这些方程被用作地位指数方程时，将不会产生标准年龄时树高值与指数值不一致的矛盾。进而分析表 2-4 中各曲线方程的拐点取值情况，可以发现编号为 K_c、R_{c_1}、R_{c_2}、R_{c_4}、W_{c_1}、L_c、Sch_c、S_c 等 8 个方程的拐点横坐标均与立地指数相关，这表明由此 8 种方程所描述的地位指数曲线族能保证不同的立地指数

具有不同的树高生长曲线，即方程为多形地位指数方程。那么这些多形地位指数方程能否保证其拐点所表示的生物学意义呢？这里不妨做进一步的探讨。可以发现，对于方程 K_c、R_{c_1}、R_{c_4}、L_c、Sch_c 的拐点表达式，当 SI 增大时，t 减小；对于方程 R_{c_2}，由于 $\ln[1-\exp(-bT)] < 0$，因此，亦存在 t 随 SI 的增大而减小的性质；方程 W_{c_1} 的拐点表达式中，t 随 SI 的变化状况与参数 c 的取值有关；由 Sloboda 方程导出的方程 S_c 的拐点表达式 t 随 SI 的变化状况不明显。这样，至少编号为 K_c、R_{c_1}、R_{c_2}、R_{c_4}、L_c、Sch_c 等 6 个方程的拐点显示出了良好的生物学意义——立地条件越好(SI 越大)，拐点出现越早(t 越小)；反之，立地条件越差(SI 越小)，拐点出现越迟(t 越大)。这充分反映了好的立地速生期到来较早的生物学规律。

基于理论生长方程研制地位指数曲线族时，导向曲线法能与差分方程法一样取得单形或多形效果，不同的是，两者拟合的数据基础不一致，从地位指数形成的方式来看，显然，差分法更具有其优越性和合理性。

2.1.2.4 参数估计

将所采集的数据资料整理成两种形式：一种是树高、年龄的形式，用于 5 种理论生长方程原型的拟合；另一种是双树高双年龄的形式，为不重复年龄段的数据组合，用于 10 种差分方程的拟合。做每一种形式的数据拟合时，都分立地、地区以及产区 3 个层次进行整合，比较不同层次各预选方程的拟合精度。由于所选方程均表现为非线性，故采用 SAS 软件的非线性回归法求解。

2.1.2.5 模型选择标准

一般检验模型好坏的依据有 2 点：一是模型及其参数的生物学含义，二是由统计指标所表征的模型实际拟合效果。但检验依据往往是两者的折中(Amaro 1998)。这里所选用的统计量有平均残差(MR)、绝对残差(AMR)、相对残差(RAR)、

表 2-5 用于模型检验的几种统计量

Table 2-5 Several kinds of the statistics used for test of models

统计指标(statistics index)	符号(symbol)	公式(formula)	理想值(ideal value)
平均残差(mean residual)	MR	$\sum_{i=1}^{n}\frac{(obs_i - est_i)}{n}$ *	0
绝对残差(absolute mean residual)	AMR	$\sum_{i=1}^{n}\frac{\lvert obs_i - est_i\rvert}{n}$	0
相对残差(relative absolute residual)	RAR	$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\lvert obs_i - est_i\rvert}{obs_i}$	0
残差平方和(residual sum of square)	RSS	$\sum_{i=1}^{n}(obs_i - est_i)^2$	0
标准残差(standard residual)	SR	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(obs_i - est_i)^2}{n}}$	0
决定系数(coefficient of determination)	R^2	$1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(obs_i - est_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(obs_i - \overline{obs_i})^2}$	1

* obs_i、est_i、n 分别表示第 i 个观测值、第 i 个估计值、观测值数目。

obs_i, est_i, n respectively represent the ith observed value, the ith estimated value, number of observed value.

残差平方和(RSS)、标准残差(SR)以及决定系数(R^2)，其中，AMR、RAR、RSS、SE 为模型精度指标，AMR 与 R^2 分别表示模型的偏差及效率。各统计量计算公式见表 2-5。

2.2 优势高生长模型模拟性能的比较分析

表 2-6 列出了 5 种理论生长方程原型及 10 种差分方程模拟优势高生长时的参数值和各项精度指标。

2.2.1 理论生长方程模拟精度产生差异之原因探讨

从表 2-6 可以看出，当数据来源于同一地区相同立地指数的林分时，各项指标均显示 5 种理论生长方程模拟精度高低结果为：Korf > Richards > Weibull > Schumacher > Logistic。将各方程拟合所得的参数值分别代入表 2-2 中的拐点表达式，得到 5 方程模拟优势高生长时拟合曲线的拐点大小。这 5 方程拐点纵坐标相对渐近值的比率，即拐点的相对位置依次为：0.0001~0.1786、0.0498~0.3103、0.0303~0.3940、0.1353、0.5。结合方程精度大小分析，可以发现：方程拐点的相

表 2-6 13 种优势高生长方程模拟所得的各项统计结果

Table 2-6 Every statistical result from modeling of 13 kinds of dominant height growth equations

数据 (data)	方程 (equation)	参数取值范围(the range of parameters)			MR	AMR	RAR	RSS	SR	R^2
		a	b	c						
立地 (site)	Korf	15.6990~87.4769	5.0164~16.4066	0.1200~1.3844	0.0022	0.2389	0.0199	27.6038	0.2662	0.9930~0.9997
	Richards	12.5186~59.5427	0.0130~0.2132	1.0633~3.6214	−0.0035	0.2697	0.0209	35.2862	0.2900	0.9879~0.9994
	Weibull	11.8894~51.3291	0.0063~0.0533	1.0318~2.0038	−0.0087	0.2935	0.0236	42.2420	0.3104	0.9863~0.9994
	Schumacher	16.4651~43.9068	8.2336~24.7520		0.0438	0.3902	0.0433	77.4831	0.4807	0.9739~0.9989
	Logistic	11.6704~31.3989	1.5846~3.0959	0.0980~0.3840	−0.0258	0.5034	0.0455	117.7375	0.5495	0.9689~0.9993
	K_c	15.1023~70.5481		0.0760~1.4662	0.0077	0.3069	0.0206	41.5303	0.3422	0.9606~0.9979
	R_{c_1}	12.2659~34.7447		1.1344~4.0557	−0.0005	0.3224	0.0205	45.1675	0.3554	0.9338~0.9981
	R_{c_4}	14.9681~39.4285	0.0009~0.1352	0.3151~3.8750	−0.0141	0.2729	0.0193	31.1026	0.2926	0.9724~0.9999
	W_{c_1}	11.5729~32.9764		1.1284~2.1800	−0.0077	0.3455	0.0218	53.7170	0.3839	0.9041~0.9979
	W_{c_2}	14.0592~40.1788	0.0025~1.7257	0.0873~2.1717	0.0120	0.2549	0.0158	31.3702	0.2849	0.9721~0.9991
	L_c	11.5692~30.2524		0.1003~0.4059	0.0391	0.5548	0.0373	130.7375	0.6200	0.9040~0.9990
	Sch_c	15.3130~41.0334			0.0726	0.4532	0.0354	98.1112	0.5499	0.9340~0.9969
	S_c	14.6754~58.7902	0.1059~2.7311	0~1.6081	0.0164	0.2559	0.0161	32.6364	0.2948	0.9642~0.9986

数据 (data)	方程 (equation)	参数取值范围(the range of parameters)			MR	AMR	RAR	RSS	SR	R^2
		a	*b*	*c*						
地区 (district)	Korf	29.7826~44.9120	6.6616~8.7804	0.6815~0.9149	0.0091	2.6611	0.1963	757.4266	11.8068	0.6256~0.8648
	Richards	22.7054~29.1024	0.0601~0.0927	1.3787~1.6735	0.0001	2.6377	0.1953	749.5918	11.6962	0.6288~0.8652
	Weibull	22.2845~28.3397	0.0186~0.0292	1.2286~1.3572	0.0043	2.6360	0.1953	749.0169	11.6877	0.6295~0.8651
	Schumacher	28.2801~34.1850	10.1664~13.5230		0.0657	2.6828	0.2018	771.3482	11.9953	0.6241~0.8491
	Logistic	21.4865~26.8332	1.9073~2.0490	0.1293~0.1744	−0.0300	2.6883	0.2077	767.4136	11.9386	0.6284~0.8580
	K_c	37.3666~83.9088		0.4244~0.7693	−0.0781	0.5062	0.0364	25.4128	0.3989	0.9820~0.9954
	R_{c_1}	26.6448~32.2117		1.1977~1.6179	−0.0872	0.5297	0.0354	27.8310	0.4396	0.9790~0.9955
	R_{c_4}	28.9271~54.4855	0.0113~0.0522	0.7666~1.2005	0.0090	0.7583	0.0547	63.0167	1.0202	0.9513~0.9931
	W_{c_1}	26.6000~31.8248		1.1291~1.3258	−0.0863	0.5489	0.0366	30.1205	0.4757	0.9758~0.9953
	W_{c_2}	98.0553~29276.4	0.0006~1.6657	0.0007~1.1333	0.0463	0.5941	0.0462	39.9226	0.6348	0.9724~0.9936
	L_c	24.7615~27.9540		0.1059~0.1788	0.0828	1.0087	0.0722	105.2357	1.7032	0.9273~0.9900
	Sch_c	27.8398~30.6511			0.0141	0.6758	0.0538	50.8875	0.8217	0.9784~0.9954
	S_c	43.6792~418048.9	0.2653~1.2449	1.0236~1.6323	−0.0019	0.4557	0.0320	19.9005	0.3048	0.9830~0.9954
产区 (producing area)	Korf	38.7003	7.5231	0.7431	0.0091	2.7092	0.2007	3251.4264	11.9538	0.7584
	Richards	25.9004	0.0706	1.4557	−0.0112	2.7260	0.2030	3250.8078	11.9515	0.7585
	Weibull	25.3907	0.0264	1.2549	−0.0129	2.7336	0.2045	3257.7093	11.9769	0.7580
	Schumacher	31.1111	11.5025		0.0671	2.7573	0.2054	3300.7397	12.1351	0.7554
	Logistic	23.4847	1.9721	0.1516	−0.0352	2.8028	0.2156	3362.6082	12.3625	0.7504
	K_c	48.9420		0.5916	−0.0491	0.5147	0.0371	114.0247	0.4192	0.9879
	R_{c_1}	28.3463		1.3784	−0.0729	0.5335	0.0363	124.3379	0.4571	0.9867
	R_{c_4}	33.2889	0.0302	0.8560	0.0162	0.7528	0.0558	281.6568	1.0355	0.9700
	W_{c_1}	30.6000		1.2620	−0.3181	0.6239	0.0415	156.9861	0.5772	0.9865
	W_{c_2}	165.1728	9.7603	0.0056	0.1223	0.5928	0.0481	178.5193	0.6563	0.9824
	L_c	25.7048		0.1273	0.1111	0.9886	0.0714	468.5967	1.7228	0.9525
	Sch_c	25.8967			0.0208	0.6572	0.0529	206.3156	0.7585	0.9846
	S_c	1382.5028	0.6097	1.5165	0.0208	0.4696	0.0332	92.5651	0.3403	0.9903

对位置与方程优势高模拟精度有着密切的相关关系，相对位置较低且存在一个变动范围的方程具有较高的模拟精度；对于相对位置固定的方程，固定值越小方程模拟精度越高，且与方程参数个数无关(如 2 参数 Schumacher 和 3 参数 Logistic 方

程)。这表明林分优势高生长曲线拐点出现得较早，从生长的角度来看，亦表明林分优势高速生期在幼龄时即已出现。实际上，对于许多树种而言，由于快速的早期生长，其优势高生长曲线不存在拐点，更符合一种上凸形状的生长模式，这恐怕也是 Logistic 方程不适宜作为优势高生长方程的缘故。从 Korf 方程拐点出现的时刻来看，本文资料收集地点的杉木人工林优势高速生期出现在 2~8a。

2.2.2 以差分方程为主的所选方程模拟性能之研究

2.2.2.1 不同建模数据层次时各方程模拟精度的分析

本文将建模数据基础分为产区、地区、立地 3 个大小不同的层次，所有数据均来自杉木中心产区，产区下划分湖南、广西、贵州及福建等 4 个数据来源地区，每一地区按指数级划分为不同的立地。从表 2-6 可以看到，当建模数据基础为立地层次时，各方程 AMR 值小于 0.5 或略大于 0.5，RAR 都小于 0.05，这说明所选方程均能较好地模拟优势高生长进程。AMR、RAR、SR 等 3 项指标显示各方程模拟精度由高到低依次为 Korf、W_{c_2}、Richards、R_{c_4}、S_c、Weibull、K_c、R_{c_1}、W_{c_1}、Schumacher、Logistic、Sch_c、L_c。这一结果表明：立地层次时，无论是否为差分形式，拐点相对位置固定的 Schumacher 及 Logistic 方程精度较低；3 参数方程(除 Logistic 方程外)的模拟精度较 2 参数方程高；理论生长方程原型较对应的保留一个自由参数的差分方程的模拟精度高；对于 Weibull 的 2 参数差分方程(W_{c_1})，参数 c 的拟合值均大于 1，表明该方程为多形表达式。可以看出，对相同立地的数据进行拟合时，多形方程模拟精度并不较单形高。R_{c_1}、Richards、Korf 等 3 方程的 MR 值相对较小，说明这 3 方程的平均残差相对 X 轴的分布更为对称。

当建模数据基础为地区层次时，从表 2-6 可以清楚地看到，所选 8 种差分方程的 SR、AMR 的最大值分别为 1.7032、1.008，分别小于方程原型 SR、AMR 的最小值 11.687 和 2.636；这 8 种差分方程的决定系数 R^2 值均在 0.95 以上，明显高于原型方程的 R^2 值(0.6241~0.865)。这就表明，地区层次时，差分方程的模拟精度较方程原型高出许多，多形方程较单形方程模拟精度更高。多形树高方程中，Korf 、Richards、Weibull 等 3 方程的 2 参数多形形式及 Sloboda 方程的 3 参数多形表达式拟合精度较高，AMR 值都在 0.55 以下，相对残差均小于 0.05，残差分布也比较均匀，表明此 4 种多形方程能较好地模拟同一地区不同立地时优势高的生长。

当建模数据基础为产区层次时，从表 2-6 可以看到，差分方程与方程原型、多形方程与单形方程之间的模拟特性表现出了与地区层次时相同的规律性。各项统计指标虽有时不同，但综合看来，Korf 、Richards 方程的 2 参数多形形式及 Sloboda 方程的 3 参数多形表达式模拟精度较高，AMR、RAR、SR 值分别小于 0.55、0.05、0.5，表明这 3 个多形方程在产区层次时也能对优势高生长进行较好的模拟；Weibull 方程的 2 参数多形形式的 MR 值最小，为−0.3181，表明该方程偏差为负且较大；Richards、Weibull2 方程 3 参数多形形式模拟精度低于相应的

2 参数多形形式。

总的来说，对于不同建模数据基础，各方程的模拟精度随建模区域的扩大而减小，立地层次时的模拟精度明显高于地区层次和产区层次，而地区层次时的模拟精度要高于产区层次。

同时本文还研究了不同地区各方程的优势高模拟情况，各项统计指标显示，差分方程较方程原型模拟精度高。5 种理论生长方程原型模拟的绝对平均残差都在 2.4 之上，均不适宜用做各地区的优势高生长模型。8 种差分方程对不同地区优势高生长的模拟性能比较稳定。限于篇幅，这里仅列出各方程模拟的 SR 值作参考(表 2-7)。从表 2-7 中可以看到，除 Sloboda 方程的 3 参数多形表达式外，其他差分方程对福建南平、三明的杉木优势高生长数据拟合的 SR 值较另 3 地区大，表明大部分模型对杉木实生苗更为适宜，这一点在 5 种理论生长方程原型上体现得更为明显。

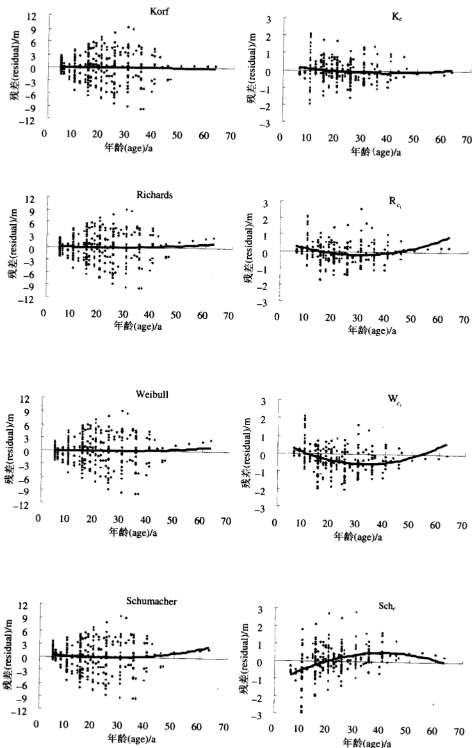
表 2-7 不同地区的各方程 SR 统计量

Table 2-7 The statistics on SR of every equation in different districts

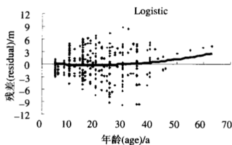
地区 (district)	方程(equation)												
	S_c	K_c	R_{c_3}	W_{c_1}	W_{c_2}	Sch_c	R_{c_4}	L_c	richards	weibull	korf	schumacher	logistic
福建(Fujian)	0.5329	0.7332	0.7690	0.7803	1.0175	1.2582	1.3452	1.6928	4.3438	4.3396	4.3623	4.3739	4.3461
贵州 (Guizhou)	0.5921	0.6787	0.7594	0.7688	0.7801	0.8172	0.9786	1.3640	2.4269	2.4280	2.4305	2.4903	2.4925
广西 (Guangxi)	0.7066	0.7274	0.7384	0.7665	0.9090	1.0121	1.1421	1.4567	3.5070	3.5093	3.5177	3.5200	3.5404
湖南(Hunan)	0.6061	0.6727	0.7024	0.7893	0.8417	0.9048	1.0572	1.3636	3.4073	3.4110	3.4077	3.4334	3.4654

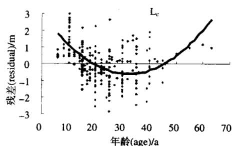
2.2.2.2 立地、年龄对优势高模型模拟精度的影响

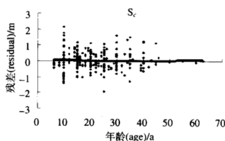
图 2-1 列出了 13 种优势高生长方程拟合的残差随年龄、立地的分布状况。图 2-1 形象地验证了当建模数据基础为产区层次时各方程模拟的精度高低情况。从图 2-1 中可以看到，不同方程的残差分布随年龄的变化规律并不一致，5 种理论生长方程的差分、多形形式与其原型间表现差异较大。各项统计指标显示模拟精度较好的方程 K_c、R_{c_1} 及 S_c 各年龄段的残差值随年龄的增大变化不明显，其残差中值一直接近于 0，其中，对于方程 R_{c_1}(即自由参数为 b 时 Richards 方程的 2 参数多形表达式)，残差分布显示方程在早期及后期略微低估了优势高的生长，而在中期约 15~40 年间高估了一点。从总体上来看，各理论方程原型绝对误差的最大值呈先增大后减小的趋势，而几乎所有的差分方程则呈逐渐减小的趋势。

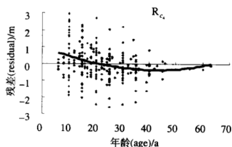


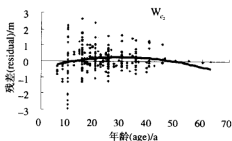
Korf
Kc
Richards
Rc1
Weibull
Wc1
Schumacher
Schc
残差(residual)/m
年龄(age)/a
12
9
6
3
0
-3
-6
-9
-12
2
1
-1
-2
10
20
30
40
50
60
70

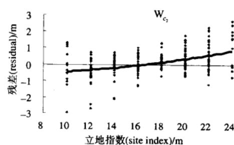

Logistic
残差(residual)/m
12
9
6
3
0
-3
-6
-9
-12
0 10 20 30 40 50 60 70
年龄(age)/a

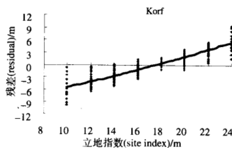

L_c
残差(residual)/m
3
2
1
0
-1
-2
-3
0 10 20 30 40 50 60 70
年龄(age)/a

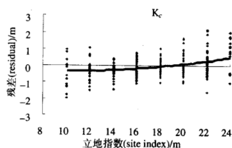

S_c
残差(residual)/m
3
2
1
0
-1
-2
-3
0 10 20 30 40 50 60 70
年龄(age)/a

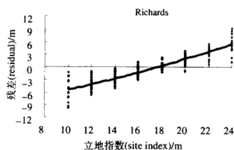

R_{c_4}
残差(residual)/m
3
2
1
0
-1
-2
-3
0 10 20 30 40 50 60 70
年龄(age)/a

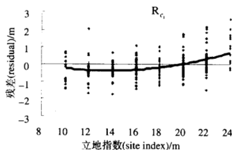

W_{c_2}
残差(residual)/m
3
2
1
0
-1
-2
-3
0 10 20 30 40 50 60 70
年龄(age)/a

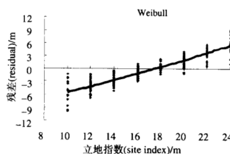

W_{c_2}
残差(residual)/m
3
2
1
0
-1
-2
-3
8 10 12 14 16 18 20 22 24
立地指数(site index)/m

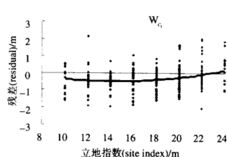

Korf
残差(residual)/m
12
9
6
3
0
-3
-6
-9
-12
8 10 12 14 16 18 20 22 24
立地指数(site index)/m

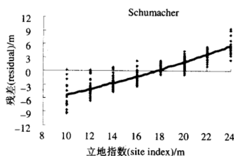

K_c
残差(residual)/m
3
2
1
0
-1
-2
-3
8 10 12 14 16 18 20 22 24
立地指数(site index)/m

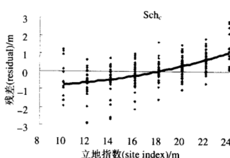

Richards
残差(residual)/m
立地指数(site index)/m

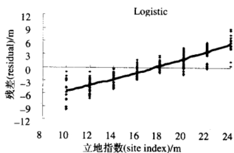

R_{c_1}
残差(residual)/m
立地指数(site index)/m

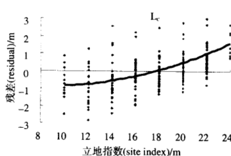

Weibull
残差(residual)/m
立地指数(site index)/m


W_{c_1}
残差(residual)/m
立地指数(site index)/m


Schumacher
残差(residual)/m
立地指数(site index)/m


Sch_c
残差(residual)/m
立地指数(site index)/m


Logistic
残差(residual)/m
立地指数(site index)/m


L_c
残差(residual)/m
立地指数(site index)/m

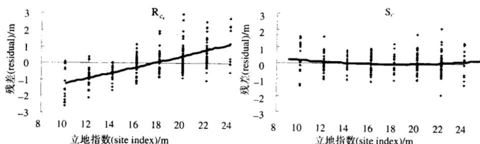


图 2-1 13 种优势高生长方程拟合的残差随年龄、立地的分布

Fig. 2-1 The residual distribution of thirteen kinds of dominant height growth equations with age and site index

从图 2-1 中可以看到，除 Sloboda 方程的 3 参数多形表达式外，优势高生长方程拟合的残差值均随立地指数的增大而呈增大趋势。总体上，所选生长模型对低立地指数的优势高生长估计偏高，而对高立地指数则估计偏低，且偏离程度随立地指数的增大呈先减小后增大的趋势。所有差分方程或多形方程相对各理论方程原型而言，残差值随立地指数增大而增大的趋势相对平缓，表明差分方程或多形方程对不同立地优势高生长的模拟性能更为稳定。从图 2-1 中还可以发现，不同方程在从偏低估计趋势到偏高估计趋势的转变过程中，立地指数的临界值不完全一致，约在 16~22 指数级之间。

2.2.2.3 模型渐近值参数的探讨

从表 2-6 中可以看到，当数据建模基础为地区和产区层次时，方程 W_{c_2} 和方程 S_c(即 Weibull 方程的 3 参数多形表达式和 Sloboda 方程的 3 参数多形表达式)拟合所得渐近值参数表现异常大，与理论生长方程渐近值参数所表征的生物学含义不相符合，除此 2 种方程外，其他方程的参数 *a* 值取值范围较为合理，基本保证了方程渐近值参数的生物学意义。造成渐近值参数异常大的原因源自于拟合数据和模拟方程 2 个方面，当模拟方程出现这种情况时，所得到的模型一般只适宜拟合数据范围内的推导，而不宜做长期的生产预测。

2.2.3 自由参数不同时方程模拟性能的分析

表 2-8 列出了 Richards 方程 3 种差分形式在地区和产区层次时模拟优势高生长的统计结果。可以看到，自由参数为 *c* 的差分式的 MR 值表现最好，但该式其他指标表现较差。Amaro(1998)曾认为此式模拟效果较好。基于本文研究的数据资料，各项指标综合表明，自由参数为 *b* 和 *a* 的差分方程模拟结果更令人满意。结合表 2-4 可以知道，自由参数为 *a* 时，差分方程为单形表达形式，因此，这 2 种方程均可用作优势高生长模型，但如用于构建多形地位指数曲线族，自由参数为 *b* 的差分方程显然是唯一的选择。

表 2-8 Richards 方程差分形式的数据拟合结果

Table 2-8 The statistical results of difference forms of Richards

数据(data)	方程(equation)	MR	AMR	RAR	RSS	SR	R^2
地区 (district)	R_{c_1}	−0.0872	0.5297	0.0354	27.8310	0.4396	0.9790~0.9955
	R_{c_2}	−0.0373	0.6549	0.0447	45.0952	0.7231	0.9693~0.9942
	R_{c_3}	0.0831	0.4974	0.0323	24.4914	0.3808	0.9776~0.9959
产区 (origin with same production)	R_{c_1}	−0.0729	0.5335	0.0363	124.3379	0.7024	0.9867
	R_{c_2}	−0.0148	0.6602	0.0462	208.2557	0.9091	0.9780
	R_{c_3}	0.0959	0.4910	0.0327	108.9995	0.6577	0.9887

2.3 多形地位指数方程的研制

良好的优势高生长模型是构建多形地位指数方程的坚实基础。从前面的研究可以知道，以差分形式出现的多形优势高模型具有良好的生物学解释基础和相当高的模拟精度，其中以 Korf、Richards、Weibull 方程的 2 参数多形表达式及 Sloboda 方程的 3 参数多形表达式模拟精度较高，这些方程均可用于多形地位指数方程的研制。鉴于 Korf 方程的 2 参数多形表达式的形式较为简洁，且又能保证高精度及关键参数的生物学意义，这里选用该式构建杉木人工林部分中心产区的多形地位指数方程[见如下式(2-6)]。

$$H = \mathrm{SI}^{20^{0.5916}/t^{0.5916}} \cdot 48.9420^{1-20^{0.5916}/t^{0.5916}} \tag{2-6}$$

将立地指数值 10、12、14、16、18、20、22、24 分别代入上式，得到图 2-2 所示的杉木人工林多形地位指数曲线族。图 2-2 中虚线描述了指数年龄为 20 时不同立地指数优势高生长所达到的高度值，可以看到，由式(2-6)所构建的杉木多形地位指数方程不会产生标准年龄时树高与指数值不一致的问题，并且由式(2-6)可以很方便地求出立地指数 SI 的表达式。

表 2-9 列出了不同立地指数时各优势高生长曲线的拐点横坐标。可以看到，随着立地指数的增大，拐点横坐标呈递减趋势，表明所建立的地位指数曲线族确保了其多形的含义，同时也反映了立地指数越高，优势高速生期到来越早的生物学特性。

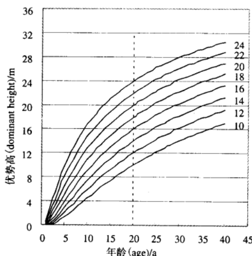


图 2-2 杉木人工林多形地位指数曲线族

Fig. 2-2 The polymorphic site index curves of China fir plantations

表 2-9 优势高生长曲线拐点随立地指数的变化情况

Table 2-9 The variation of inflection point of dominant height growth curve with site index

拐点(inflection point)/a	立地指数(site index)/m							
	10	12	14	16	18	20	22	24
横坐标(abscissa)	8.20	6.68	5.49	4.53	3.76	3.11	2.57	2.12

2.4 结论

多形优势高模型及多形地位指数方程的研制一直是森林生长模型研究领域的重点和难点。本文放弃以前经常采用的参数预估法及导向曲线法，而采用差分法构建了以 Korf 等 6 种理论生长方程为基础的多种多形地位指数方程，探讨了它们的多形表达含义，并对所选用的 13 种优势高方程的模拟性能进行了较为全面的分析，得到 5 点主要结论：①基于理论生长方程，通过差分法可以构建具有良好生物学解释基础的多形优势高方程；②理论生长方程的拐点取值情形对其模拟优势高生长的精度具有至关重要的影响；③对于同一立地的优势高生长模拟，方程原型及差分方程均具有较好的模拟性能，而前者精度更高；但对于更大范围数据的拟合，如地区或产区层次时，显然差分方程表现更优；④多形优势高方程展现出了较高的模拟精度，其中以 Korf、Richards、Weibull 方程的 2 参数多形表达式及 Sloboda 方程的 3 参数多形表达式为佳；⑤采用优良的多形优势高生长模型能够构

建说理性完备的多形地位指数方程。

参 考 文 献

段爱国，张建国，童书振. 2003. 6 种生长方程在杉木人工林林分直径结构上的应用. 林业科学研究，16(4)：423~429

克拉特 J L，弗尔森 J C，皮纳尔 L V 等. 1987. 用材林经理学——定量方法. 范济洲，董乃钧，于政中等译. 北京：中国林业出版社

李久先. 1996. 三种生长模式在红桧人工林生长适用性之探讨. 中华林学季刊，29(2): 3~14

李希菲，王明亮，黄旺志. 1999. 利用线性模型检验杉木不同种源立地指数曲线模型的通用性. 林业科学研究，12(5)：505~509

刘景芳，童书振.1996. 杉木经营新技术. 世界林业研究，9 (专辑)：46~80

骆期邦，吴志德，蒋菊生等. 1989. Richards 函数拟合多形地位指数曲线模型的研究. 林业科学研究，2(6)：534~539

南方十四省(区)杉木栽培科研协作组. 1982. 全国杉木(实生林)地位指数表的编制与应用. 林业科学，18(3)：266~277

Amaro A，David R，Margarida T et al. 1998. Modeling dominant height growth：eucalyptus plantations in Portugal. For Sci, 44(1)：37~46

Avery T E，Burkhart H E. 1994. Forest measurement. New York: McGraw-Hill Book Co，408

Borders B E，Bailey R L, Clutter M L. 1988. Forest growth models：parameter estimation using real growth data series. *In*: Forest Growth Modeling and Prediction. Vol. 2. USDA For Serv Gen Tech Rep. NC-120, 660~667

Borders B E，Bailey R L，Ware K D. 1984. Slash pine site index from a polymorphic model by joining(splining) non-polynomial segments with an algebraic difference method. For Sci, 30：411~423

Clutter J L，Forsion J C，Pienaar L V et al. 1983. Timber management. New York: John Wiley and Sons，333

Devan J S, Burkhart H E. 1982. Polymorphic site index equations for loblolly pine based on a segmented polynomial model. For Sci，28：544~555

Gadow K V，Hui G Y. 1998. Modelling Forest Development. Goettingen：Cuvillier Verlag

Garcia O. 1997. Another look at growth equations. Working paper. Copenhagen: Royal Veterinary and Agricultural University

Kalle E. 2002. A site dependent simultaneous growth projection model for Pinus kesiya Plantations in Zambia and Zimbabwe. For Sci，48(3)：518~529

Lee S H. 1999. Developing and comparing site index curves using polymorphic and anamorphic equations for Douglas fir. Jour Korean. For Soc. 88(2)：142~148

Lee Y J，Hong S C. 1999. Estimation of site index curves for slash pine (Pinus elliottii engelm) Plantations. Jour Korean. For Soc, 88(3)：285~291

Mark O K, Nick J L. 1998. Site index curves for Pinus nigra grown in the south island high country, New Zealand. New Zealand Journal of Forestry Science，28(3)：389~399

Newberrv J D, Pienaar L V. 1978. Dominant height growth models and site index curves for siteprepared slash pine plantations in the lower coastal plain of Georgia and North Florida. Univ of Ga Plantation Mgt Res Coop Res

Rennolls K. 1995. Forest height growth modeling. For Ecol Manage，71：217~225

Zeide B. 1993. Analysis of growth equations. For Sci，39(3)：594~616

3 杉木人工林林分直径结构模拟

林分生长模拟是掌握预测林分生长过程并用于制定合理营林措施和提出营林决策的重要手段，是现代林业信息技术的一个重要组成部分。人工林林分生长是以一定树种的林分生长概念为基础，在很大程度上取决于以下 4 个因子：①林分年龄；②林地的生产潜力(立地条件)；③对林地生产潜力现实充分利用程度(林分密度)；④培育措施的应用(间伐、施肥、竞争植物的控制)。林分生长模型基于这四个因子采用生物统计学方法构造数学模型预测林分生长。

Bruce(1987)在世界林分生长模型和模拟会议上提出了林分生长模型和模拟的定义：林分生长模型是指一个或一组数学函数，它描述林木生长与林分状态和立地条件的关系；模拟是使用生长模型去估计在各种特定经营条件下林分的发展。该定义明确指出了模型和模拟的关系。例如，系统动力学方法是一种模拟技术，其使用的具体方程式及其参数值是模型。为了合理经营林分，更好地利用森林资源，提高森林生产力，必须及时了解森林生长变化的动态规律，因此，利用林分生长收获模型预测林分生长收获量的方法已成为森林经营和管理的重要手段。

林分直径结构是林分结构的基本规律之一，一直备受林学家的关注。直径结构模型虽然不及单木模型提供的信息多，但所需的资料不太多，且比全林分模型详细。它突出的优点是能以林分水平的资料，输出总体收获和总收获中不同材种所占的比例，在林分生长预测、抚育间伐和林木死亡等林业实践中有着其他类型的模型不及的优点。因此，从林木经营管理者的角度来看，林分直径结构模拟的研究具有其重要的理论和实际价值。

3.1 6 种生长方程在杉木人工林林分直径结构上之应用

林分直径结构模型的研究 20 世纪 80 年代在我国兴起，经过近 20 年的摸索，对国内许多树种的林分直径结构均建立了模拟预测模型，对国外一些应用较广的理论生长方程也进行了一定程度上的理论探索和实际应用。但纵观以往的研究，还存在许多问题：对林分直径结构进行模拟时模型的拟合精度不够高；缺乏系统的模型间的比较研究，一种或两种方程的应用研究不能说明特定林分的适宜模拟情况；理论生长方程较少地应用于林分直径分布方面，并对理论生长方程在此方面的适用性缺乏系统深入及拓展性的研究工作。不能盲目地、不加区别地引用，应对其适应性进行分析，这样将有利于研究问题的解决，也有利于理论生长方程的进一步发展。据此，利用大量真实、可靠的杉木人工林长期观测试验地数据，

应用概率密度函数中运用最广的 Weibull 分布函数及理论生长方程 Gompertz、Mitscherlich、Logistic、Richards 和 Korf 等 6 种方程对胸高直径株数分布予以模拟，通过对这 6 种生长方程的数学解析，探索理论生长方程在直径分布领域的适用性，找出最适用的模拟方程，并推动生长方程的发展，使杉木人工林直径结构得到科学可靠的描述。

3.1.1 材料与方法

3.1.1.1 试验区概况

试验区设置在江西省分宜县大岗山林区。大岗山区属罗霄山脉北端的武功山支脉，位于东经 114°30′~114°45′，北纬 27°30′~27°50′。该区地质构造属华夏系，主要山脊呈南北走向，整个地势西高东低，逐渐倾斜，地形起伏较大，相对高差达 1000m，最高峰大岗山海拔 1091.8m。低山(海拔 500~1000m)面积为 2142.8hm^2，高丘(海拔 300~500m)面积为 2647.2hm^2，中丘(海拔 100~300m)面积约为 3911.7hm^2，低丘(海拔 100m 以下)面积有 638.2hm^2。

大岗山区气候温暖湿润，属亚热带季风湿润类型，年平均温度为 15.8°~17.7°。七月平均最高温度 28.8°，日最高温度 39.9°；一月平均最低温度为–5.3°，日最低温度–8.3°。全年日照平均时数为 1657h，最高为 2047h，最低为 1378h，日照百分率约为 37%。太阳总辐射年平均为 486.6kJ/cm^2。平均蒸发量约为 1503mm，最多为 1770.8mm，最少为 1274mm。年平均降水量为 1591mm，最多为 2227.6mm，最少为 1069.8mm。年平均无霜期为 265d。

本区属地带性低山丘陵红壤、黄壤类型及其亚类的分布区。随着地形变化，形成不太明显的垂直地带谱，既由低海拔至高海拔依次为红壤、黄红壤、红黄壤、黄壤、黄棕壤。一般丘陵和低山的下部土壤深厚肥沃，林分生产力较高；山顶和山脊部土壤贫瘠，林木生长很差。母岩有砂岩、砂页岩、千枚岩、页岩、板岩、花岗岩和石灰岩等，其中砂页岩、千枚岩、板岩、花岗岩的分布面积较大。成土母质多为残积型和坡积型。

本区杉木林下主要植被有狗脊[*Woodwardia japonica* (H. F.) Sm.]、鳞毛蕨(*Dryopteris* spp.)、金星蕨[*Parathelyteris glanduligera* (Kze.) Ching]、海金沙(*Lygodium* sp.)、铁芒萁[*Dicranopteris dichotoma*(Thunb) Bernh]、土茯苓(*Smilax* sp.)、乌蕨[*Stenoloma chusanum*(L.) Ching]、鼠刺(*Iteachinensis* Hook. et Arn.)、柃木(*Eurnh* spp.)、油茶(*Camellia oleifera* Abel.)、鸡血藤(*Millettia reticulata* Benth)、五节芒[*Miscanthus flaridulus*(Labill) Warb.]、淡竹叶(*Lophantherum gracile* Brongn)、小蓼(*Polygonumm tenellum* Bl.)、苦苔(*Conandron ramondioides* Sieb. et Zucc)、大青(*Clerodendrum cyrtophyllum* Turcz.)、三花悬钩子(*Rubus trainthus* Focke)等。

本文研究试验地为大岗山年株林场和山下林场，包括杉木密度试验林、密度调控试验林和不同强度的间伐林。试验点自然地理概况见表 3-1。

表 3-1 试验点自然地理概况

Table 3-1 The natural geographical condition of trial plots

试验点	东经	北纬	海拔/m	地貌	母岩	土壤	年降水量/mm	平均气温/°C	年蒸发量/mm
年株	114°33′	27°34′	250	低山	砂页岩	黄棕壤	1656	16.8	1503
山下	114°33′	27°34′	100	低丘	砂页岩	棕黄壤	1000~1700	17.9	1503

3.1.1.2 试验设计和林分调查

(1) 试验设计

造林密度试验林设计：试验点选在年株林场场部后山，于 1981 年春采用 1 年生苗营造试验林，由 2m×3m(*A*)、2m×1.5 m(*B*)、2m×1m(*C*)、1m×1.5m(*D*)、1m×1m(*E*)5 种密度组成一个区组，累计 3 次，共 15 个小区，分别记为(a_1、a_2、a_3、…，e_1、e_2、e_3)，每个小区面积为 600m^2。采用随机区组排列，并在每个小区四周各设计两行同样密度的保护带。另设立了两块试验林，面积分别为 600m^2、510 m^2，相应记为 e_4、e_5，后一块进行间伐，间伐强度按密度管理图的密度管理线 0.5 左右进行控制。

间伐试验林设计：试验点选在山下林场，1973 年春季采用 1 年生苗造林，1981 年春设置标地，其时各林分均为 9 年生。共设 16 块固定样地，每块样地面积为 500m^2(25m×20m)，分四个区组(记为 A、B、C、D)，每个区组设置对照、弱度间伐、中度间伐、强度间伐 4 种，间伐方式为下层间伐。用刘景芳、童书振编制的杉木密度管理图的密度管理线来指导间伐，当林分优势高达到密管线 0.5~0.6 范围时开始间伐。对照区不间伐；弱度是在密管线范围内进行间伐；中度在 0.4~0.5 范围内进行间伐；强度在 0.3~0.4 范围内间伐。每块样地间伐 2~3 次后停止间伐。

造林密度调控试验设计：该项试验是在年株林场另一块造林密度试验林内进行，具体试验在青石湾，其立地条件、造林设计方法以及林分调查因子与第一块造林密度试验完全相同，共 3 个区组，15 个小区，但其设计思想与造林密度试验和间伐试验不同。造林密度试验是造不同密度的林分后不间伐，观测其生长情况；间伐试验是在初植密度基本相同的林分内，采取不同的间伐强度后，观测其生长情况；而造林密度间伐试验是在初植密度不同的林分内，以密度管理图的密管线 0.5 为标准进行动态下层间伐，间伐后保留密度与临近的下一个初植密度较小的林分密度基本相同，从而对这两个密度基本相同的林分生长进行比较研究。例如，初植密度为 600 株/600m^2 的 E 小区间伐后，保留密度 400 株/600m^2，与原初植密度为 400 株/600m^2 的 D 小区比较，由 400 株间伐到 300 株，与初植密度 300 株的 C 小区比较，以此类推。

(2) 林分调查方法

造林密度试验林：每次调查均于林分停止生长后或下年开始生长前进行，对每株树挂牌记号做连续观测，10 年生前逐年调查，10 年生后隔年调查。2~5 年生

时，测定每木树高、冠幅及树高达 1.3m 以上的胸径。6 年生开始，除测定每木胸径外，每个小区采取机械抽样法，测定 100 株的树高、冠幅和枝下高，用树高曲线法求算林分平均高，用断面积加权法，求算林分平方平均胸径，至 1999 年止。在每个小区的上、中、下各选 2 株优势木，将这 6 株优势木高平均得林分优势木平均高。10 年生开始，每个小区改测 50 株的树高、冠幅和枝下高。

间伐试验林：调查因子与造林密度试验相同，选取均匀分布在样地的 5 株优势木进行调查，测算林分优势木平均高。1982 年第 1 次间伐后，每 2 年调查 1 次，当林分优势高和林分密度在林分密度管理图上的交点达到上述设计要求时进行再次间伐。

造林密度调控试验林：调查因子与上同，12 年生前逐年调查，12 年生后隔年调查。每年调查后，各样地均根据优势高和密度查密管线，当优势高和密度的交点达到 0.5 以上，则进行间伐。

3.1.1.3　数据

采用样地共计 48 块，年株、山下两林场每块样地面积及采用林分年龄范围分别为 600 m^2、6~20 a 和 500 m^2、9~27 a，样地初植密度分布范围为 1533~9983 株/hm^2。每块样地均经多次观测，每 1 次观测均记为 1 个独立样本，总样本数 491 个，立地指数为 12、14、16、18 的样本数分别有 59、263、139、30 个，间伐与未间伐的样本数分别为 173、318 个。按照 2 cm 的径阶距，将每一样本的直径序列划分径阶，分别统计各径阶林木株数，得出林分径阶分布表，并计算各径阶累积百分比分布。各样地具体信息见表 3-2。

表 3-2　样地调查情况总述

Table 3-2　The basic condition of samples

试验点	样地	密度范围 (株/hm^2)	年龄 (a)	调查次数	间伐年度 (a)	平均优势高 (m)	指数级
年株林场	a_1	1667~1633	5~20	11	/	5.82~15.87	16
(场部后山)	a_2	1667~1667	5~20	11	/	5.45~15.35	12
	a_3	1667~1633	5~20	11	/	5.72~16.38	16
	b_1	3333~3267	5~20	10	/	5.65~15.08	16
	b_2	3333~3317	5~18	11	/	5.53~13.97	14
	b_3	3333~3200	5~20	11	/	5.47~15.83	16
	c_1	5000~4667	5~20	11	/	5.53~14.52	14
	c_2	5000~4617	5~20	11	/	5.12~14.52	14
	c_3	5000~4267	5~20	11	/	5.47~14.08	14
	d_1	6650~6067	5~20	11	/	5.02~12.98	12

续表

试验点	样地	密度范围 (株/hm^2)	年龄 (a)	调查次数	间伐年度 (a)	平均优势高 (m)	指数级
	d_2	6650~5867	5~20	11	/	4.47~13.22	14
	d_3	6667~5450	5~20	11	/	5.25~13.32	14
	e_1	9933~7667	5~20	11	/	5.32~14.23	14
	e_2	9933~7267	5~20	11	/	4.85~14.58	14
	e_3	9967~5883	5~20	11	/	5.48~16.3	14
	e_4	9883~7367	5~20	11	/	4.75~12.35	12
	e_5	9941~1628	5~20	8	7、9、10、16	4.63~12.32	12
年株林场	a_1	1617~1550	5~20	12	/	3.92~14.68	14
(青石湾)	a_2	1633~1583	5~20	12	/	3.87~16.47	16
	a_3	1617~1550	5~20	12	/	3.9~16.67	16
	b_1	3283~2583	5~20	12	/	4.08~14.58	14
	b_2	3233~2583	5~20	12	16	3.57~15.76	14
	b_3	3217~1683	5~20	12	16	4.1~16.02	16
	c_1	4750~1650	5~20	12	12、16	3.83~14.7	14
	c_2	4783~1617	5~20	12	11、14	4.45~16.45	14
	c_3	4900~1667	5~20	12	11、14	4.23~15.58	14
	d_1	6383~3367	5~20	12	16	2.99~11.92	12
	d_2	6333~1667	5~20	12	9、11、14	4.46~15.9	14
	d_3	6517~1750	5~20	12	9、11、14	4.62~16.33	16
	e_1	9583~3300	5~20	12	8、11、14	3.23~11.52	12
	e_2	9383~1800	5~20	12	8、10、11、16	3.44~14	14
	e_3	9600~1617	5~20	12	8、10、11、14	3.92~15.72	16
山下林场	a_1	3980~2280	9~18	7	/	9.48~17.26	18
	a_2	3980~2280	9~18	7	10、12、14	9.36~16.96	18
	a_3	3760~2000	10~18	6	10、12、14	11.68~18.06	18
	a_4	3500~1000	10~20	7	10、12、14	11.82~18.63	18
	b_1	4800~3820	9~25	9	/	6.65~15.66	14
	b_2	5380~3540	9~25	9	12、14	6.58~15.56	14
	b_3	4660~2800	9~27	11	12、14	6.66~16.34	14

续表

试验点	样地	密度范围(株/hm²)	年龄(a)	调查次数	间伐年度(a)	平均优势高(m)	指数级
	b_4	4340~1940	9~27	11	12、14	6.54~16.08	14
	c_1	4720~2480	9~27	11	12、14	6.54~16.16	14
	c_2	4380~1920	9~27	11	12、14	6.6~17.18	14
	c_3	4840~2600	9~25	9	12、14	7.66~18.18	14
	c_4	4460~3100	9~27	11	/	6.66~16.1	14
	d_1	4420~1120	9~27	11	10、12、14	8.22~17.68	16
	d_2	4400~1320	9~27	11	10、12、14	8.2~18.54	16
	d_3	4700~1680	9~27	11	/	8.14~18.52	16
	d_4	4617~1640	9~27	11	10、12、14	8.04~17.9	16

3.1.1.4 *研究方法*

(1) Richards 等 6 种生长方程的数学性质及彼此间的关系

采用 Weibull 分布函数及理论生长方程 Gompertz、Mitscherlich、Logistic、Richards 和 Korf 等 6 种不同的生长方程对林分直径累积分布进行模拟。从表 3-3 中可以发现生长方程间存在比较紧密的相互转化关系。对 Richards 方程而言，有 5 种情形：①$m<1$ 时，可写为 $y=A(1-be^{-kx})^{\frac{1}{1-m}}$，式中 A，b，$k>0$，即人们通常应用的 Richards 方程的表现形式；②$m>1$ 时，可写为 $y=A(1+be^{-kx})^{-\frac{1}{m-1}}$，式中 A，b，$k>0$，称为 Logistic 型；③$m=0$ 时，为 Mitscherlich 生长方程 $y=A(1-Be^{-kx})$，式中 A，b，$k>0$；④$m=2$ 时，化为 Logistic 方程，即 $y=A(1+be^{-kx})^{-1}$，式中 A，b，$k>0$，这一点从考察两式的微分式可以明确地得到，也揭示了两方程间的微妙关系；⑤$m\to1$ 时，方程转化为 Gompertz 生长方程，即 $y=Ae^{-be^{-kx}}$，式中 A，b，$k>0$。当 Korf 方程中参数 $c=1$ 时，该式转化为 Schumacher 方程；当 $c\to\infty$时，可转化为 Gompertz 方程。对于 Weibull 函数，当其参数 $c=1$ 时，该式转化为 Mitscherlich 方程。

各方程的渐近线的存在及良好的单调性使其具备了对林分直径累积分布进行模拟的数学基础。利用累加生成、标准化数据处理方法将林分直径的原始数据化成(0，1)区间的数列，这样，具体应用时，各方程的上渐近值均定为 1 即可。

(2) 生长方程在林分直径结构上应用的理论依据探讨

考察直径的累积频率 y，可将直径累积频率的增长比做自然界中种群的发展，于是，可设直径累积频率的增长量 dy/dx 正相关于累积频率并且受到最大频率的限

表 3-3　6 种生长方程之数学解析性

Table 3-3　The mathematically analytic qualities of six kinds of growth equations

方程	Gompertz	Mitscherlich	Logistic
形式	$y = k\exp(-e^{a-bx})$	$y = A(1-le^{-mx})$	$y=\frac{C}{1+e^{p-qx}}$
微分	$\frac{dy}{dx} = by(\ln k-\ln y)$	$\frac{dy}{dx} = m(A-y)$	$\frac{dy}{dx}=qy(1-\frac{y}{C})$
生长率	$\frac{1}{y}\frac{dy}{dx} = be^{a-bx}$	$\frac{1}{y}\frac{dy}{dx} = \frac{ml}{e^{mx}-l}$	$\frac{1}{y}\frac{dy}{dx} = \frac{q}{1+e^{-p+qx}}$
参数	k，a，b(k>0，$b>0$)，其中，k 为 y 的上渐近值，a 为与 y 初值有关的参数，b 指内禀生长率	A，m，l($A>0$，$m>0$，$0<l\leqslant 1$)，其中，A 为 y 的上渐近值，l 为与 y 初值有关的参数，m 指内禀生长率	C，p，q(C，q>0)，其中，C 为 y 的上渐近值，p 为与 y 初值有关的参数，q 指内禀生长率
渐近线	$y = 0$ ；$y = k$	$y = A$	$y = 0$ ；$y = C$
拐点	$x = a/b$，$y = k/e$	无	$x = p/q$，$y = C/2$

方程	Richards	Korf	Weibull
形式	$y=A(1-be^{-kx})^{\frac{1}{1-m}}$	$y=Ae^{-b\frac{1}{x^c}}$	$y=A\left\{1-\exp\left[-\left(\frac{x}{b}\right)^c\right]\right\}$
微分	$\frac{dy}{dx}=\frac{k}{1-m}y \times\frac{1}{1/[1-(y/A)^{1-m}]-1}$	$\frac{dy}{dx}=b^{-\frac{1}{c}}(c+2) \times y(\ln A-\ln y)^{\frac{c+1}{c}}$	$\frac{dy}{dx}=\frac{Ac}{b}[\ln A-\ln(A-y)]^{\frac{c-1}{c}} \times\left(1-\frac{y}{A}\right)$
生长率	$\frac{1}{y}\frac{dy}{dx}=\frac{\frac{1}{1-m}kb}{e^{kx}-b}$	$\frac{1}{y}\frac{dy}{dx}=b(c+2)x^{-c-1}$	$\frac{1}{y}\frac{dy}{dx}=\frac{c}{b}\left(\frac{x}{b}\right)^{c-1}\frac{1}{e^{\left(\frac{x}{b}\right)^c}-1}$
参数	A，b，k，m(A，k，m>0)中，A 为 y 的最终值即上渐近值，b 决定 $x\doteq 0$ 时生长因子的大小，参数 m 决定曲线形状及拐点位置，参数 k 则与生长速度有关	A，b，c(A，b，c>0)中，A 为 y 的最终值即上渐近值，b 与树木相对生长速度有关，c 决定函数拐点位置	A，b，c(A，b，c>0)中，A 为 y 的最终值即上渐近值，b 为尺度参数，c 为形状参数，当 c>1 时方程存在拐点
渐近线	$y = y_0$；$y = A$	$y = 0$；$y = A$	$y = y_0$；$y = A$
拐点	$x = \frac{1}{k}\ln\left(\frac{b}{1-m}\right)$ $y = Am^{\frac{1}{1-m}}$	$x = \left(\frac{c+1}{bc}\right)^{-\frac{1}{c}}$ $y = Ae^{-\frac{c+1}{c}}$	$x = b\left(1-\frac{1}{c}\right)^{1/c}$ $y = A\left(1-e^{\frac{1-c}{c}}\right)$

制，则各方程微分式可以写成

$$dy/dx = rf(y)g(y)$$

式中，r 为各方程参数的数学组合，可理解为各方程的内禀生长率，$f(y)$与 y 成正相关，$g(y)$受 y 上渐近值的约束，并与 y 成负相关。

各方程的 r、$f(y)$、$g(y)$等项如表 3-4 所示。

表 3-4　各生长方程微分式之组合因子

Table 3-4　The composite factor of differential formula of every growth equation

生长方程	组合因子		
	r	$f(y)$	$g(y)$
Gompertz	b	y	$\ln k - \ln y$
Mitscherlich	m	1	$A-y$
Logistic	q	y	$1-\frac{y}{C}$
Richards	$\frac{k}{1-m}$	y	$\frac{1}{1/[1-(y/A)^{1-m}]-1}$
Korf	$b^{-\frac{1}{c}}(c+2)$	y	$(\ln A - \ln y)^{\frac{c+1}{c}}$
Weibull	$\frac{Ac}{b}$	$[\ln A - \ln(A-y)]^{\frac{c-1}{c}}$	$1-\frac{y}{A}$

表 3-4 中，Gompertz、Mitscherlich、Logistic、Richards 以及 Korf 方程的正相关项 $f(y)$比较明显(Mitscherlich 式正相关量看做常量 1)。Weibull 方程中，当 $c>1$ 时，其 $f(y)$项随 y 增大而增大；当 $c = 1$ 时，Weibull 式转化为 Mitscherlich 式；当 $0<c<1$ 时，方程不存在拐点，此时 $f(y)$与 $g(y)$共同组成微分式负相关项。Gompertz、Mitscherlich、Logistic、Korf 以及 Weibull 方程微分式的负相关项比较清晰。在 Richards 方程中，当 $0<m<1$ 时，其微分式 $g(y)$项随 y 值增大而减小；当 $m>1$ 时，负相关项 $1/\{1/[1-(y/A)^{1-m}]-1\}$与 y 成正相关，但由于 r 值变为负数，在转移负号后，微分式 $g(y)$项化为 $1/\{1/[1-(y/A)^{1-m}]-1\}$，该式随 y 值增大而减小，形成负相关项。一般而言，在自然界中，环境容纳量的限制简化为一种线性限制，然而，实际上这种限制可以为线性(如 Logistic 方程)，亦可为非线性(如 Richards 方程)。表 3-4 中，Mitscherlich 式以及 Weibull 式参数 c 取值范围为(0，1)时的情形可理解为一种特例。Boris Zeide 在将各方程划分成 LT 和 LTD 两种形式时将 Weibull 式排除在外。本文将生长方程微分式化为生长因子的正相关项与负相关项之乘积后就比较明确地掌握了方程的结构，并具备一定的理论解释基础，当然这种理论解释限于自然界及与自然界环境相似的情形，对于其他理论生长方程有待进一步探讨。

(3) 方程参数的求解方法

由于 6 种生长方程均为非线性方程，其参数先由经验值及林分直径分布曲线估计初值，再采用 SAS 软件之非线性回归法求解。采用残差平方和(RSS)与剩余标准差(standard error of residue, SER)比较各生长方程的模拟精度。

3.1.2 生长方程模拟的参数值范围

对 491 个样本逐一采用 6 种生长方程分别进行模拟，得到各方程应用于每个样本的参数值及各参数值分布范围。Richards 和 Korf 方程参数 b 的径阶划分区间值分别为：$-\infty$、−1 000 000、−100 000、−10 000、−1000、−100、0、$+\infty$；$-\infty$、100、1000、10 000、100 000、1 000 000、10 000 000、100 000 000、1 000 000 000、$+\infty$。其他参数的分布，中值代表以该值为中心，以相邻两个中值之差的 1/2 为正负浮动项的分布区间，如 1 表示 0.5 与 1.5 之间的数值。最小与最大径阶中值的分布次数包含了参数两头的数值出现的次数。例如，对 Gompertz 方程参数 b，径阶中值 0.2 的分布次数表示小于 0.25 的数值出现次数；对 Richards 方程参数 b，径阶中值 5 的分布次数表示(0，$+\infty$)区间数值的出现次数。

表 3-5 各方程参数的分布情况

Table 3-5 The range of parameters of every equation

方程	Gompertz		Mitscherlich		Logistic	
参数	a	b	l	m	p	q
总体分布范围	0.6046~11.1631	0.0403~1.2629	0.5636~52.2447	0.0337~0.8723	1.5744~17.2631	0.3246~1.3236
主要分布区间	3、4、5	0.3、0.4、0.5	2、3	0.1、0.2、0.3	5、6、7	0.55 、 0.65、0.75、0.85
主要分布范围	2.5~5.5	0.25~0.55	1.5~3.5	0.05~0.35	4.5~7.5	0.5~0.9
百分比/%	72.91	73.12	93.28	67.01	60.29	71.08

方程	Richards			Korf		Weibull	
参数	b	k	m	b	c	b	c
总体分布范围	−4.6409*E*+9~133.0362	0.2657~2.3339	0.5406~9.2906	0.1232~5.1522*E*+12	1.5203~18.8601	0.7358~20.8744	0.3922~11.9762
主要分布区间	−5000、−500、−50	0.45、0.55、0.65、0.75、0.85	1.5、2.5	500、5000、50000、500 000	4、5、6	6、8、10、12、14	3.5、4.5、5.5
主要分布范围	−10 000~0	0.4~0.9	1~3	100~1 000 000	3.5~6.5	5~15	3~6
百分比/%	75.97	66.19	79.43	72.1	69.45	78.82	72.1

从表 3-5 可以看出各方程的参数均存在一个分布范围。经统计，Richards 方程中参数 $m > 1$ 时的比例为 98%，表明在模拟林分直径分布时 Richards 方程主要以 Logistic 型出现。Weibull 方程中参数值 c 均大于 1，表示该方程在模拟林分直径分

布时方程曲线均存在拐点。各方程参数在一个相对较小的范围内具有超过多数乃至绝对多数的分布频率，这充分反映了不同的林分在形成生长方程模拟参数差异的同时，也因其自然发展的某些共同特性及研究对象——林分直径结构的一般性规律，致使各方程参数存在一个主要分布范围。不同生长方程的参数分布范围及主要凝聚区间的存在说明了各方程模拟的灵活性及准确性。

3.1.3 生长方程模拟精度分析

3.1.3.1 单个样本拟合的精度分析

采用残差平方和进行精度比较分析后，得到每个样本的最优拟合方程，进而统计出不同年龄时各方程被选优的次数。

表 3-6 不同年龄时各方程被选优的次数

Table 3-6 The selected times of every equation at the different stand ages

方程	年龄/a													
	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20	22	25	27
Richards	26	24	27	28	38	26	34	31	32	32	33	6	4	4
Weibull	7	8	4	18	13	6	15	16	15	15	19	6	8	5
Logistic	1	1	2	0	3	0	1	1	2	4	3	0	2	1
Gompertz	1	0	0	0	0	1	2	1	2	0	0	0	0	0
Mitscherlich	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Korf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

从表 3-6 统计得出，Richards、Weibull、Logistic、Gompertz、Mitscherlich、Korf 等 6 种生长函数的选优率(即各方程最优样本数与总样本数的百分比)分别为 70.06%、31.57%、4.48%、1.83%、0.2%、0。Richards 及 Weibull 生长函数的选优率极高，最优函数出现两者之一的比例高达 99.19%。在山下林场的那片间伐试验林，Weibull 生长方程选优率达 45.91%，表明该方程能较好地对间伐林分的直径分布进行模拟。除了 Korf 方程外，Logistic、Gompertz、Mitscherlich 三式均存在被选优的情况，这说明由于各个林分直径结构实际组成不一，符合的生长方程也会不一样，即每个生长方程都可能表现最佳，不存在一个生长方程在任何情形下均表现为最优，尤其是在不可预测、无任何规律的人为或自然干扰的情况下。这也许是不同的研究选用的方程不同的原因之一。有些林分同时具有多个最优方程，这多个最优函数在对林分进行模拟时，方程参数各异，但方程(具有拐点)的拐点却表现十分一致，这说明不同的方程在某些情况下亦能表现出相同的林分生长特性。考察每块小区的长期拟合过程发现，年株林场青石湾试验林的一些小区林分直径

分布在不同的生长年龄适合的生长方程表现一致，其他也有一些林分在不同年龄时适合的生长方程大都相同，而相同的生长方程能更可靠地解释林分的动态变化情况。这说明，选择一个最适宜林分长期发展且性能较好的生长方程是可能的，也是非常必要的。

3.1.3.2　*样本总体拟合精度分析*

理论值和观测值间差异的表示方法很多，本文选用残差平方和及剩余标准差进行分析，结果显示两种比较方法得到的样本总体拟合精度大小顺序完全一致(表3-7)。这主要是因为本文样本径阶数范围为4~13，且大部分为6~9。这一结果说明，在一个不大的自由度范围内，残差平方和与剩余标准差精度检验效果一致。

表 3-7　各生长方程之残差平方和及剩余标准差

Table 3-7　RSS and SER of every growth equation

标准	Logistic	Gompertz	Richards	Korf	Weibull	Mitscherlich	精度大小排序
残差平方和	1.5280	4.2968	0.7391	10.0799	1.6549	55.2392	R>L>W>G>K>M*
剩余标准差	10.5174	18.1300	6.8795	28.7844	10.8341	65.6401	R>L>W>G>K>M

* R、L、W、G、K、M 分别指代 Richards、Logistic、Weibull、Gompertz、Korf 、Mitscherlich。
R, L, W, G, K, M respectively represent Richards, Logistic, Weibull, Gompertz, Korf, Mitscherlich.

由表 3-7 可知，6 种生长方程的总体精度大小依次为 Richards、Logistic、Weibull、Gompertz、Korf、Mitscherlich，其中，Richards 式精度明显高出其他方程，分别为 Logistic、Weibull、Gompertz、Korf 及 Mitscherlich 方程的 1.5、1.6、2.6、4.2、9.5 倍(按剩余标准差计算)，Logistic 和 Weibull 两式精度差异不明显。

结合先前对方程的分析结果，发现精度最低的方程为没有拐点的 Mitscherlich 生长方程。除去该方程后，Richards、Logistic、Weibull、Gompertz 及 Korf 等 5 种生长方程的相对生长率依次表现为变量的指数函数、指数函数、指数与幂函数的混合、指数函数及幂函数，从表 3-7 中可以发现相对生长率表现为变量的指数函数的方程精度普遍要高，仅 Weibull 式作为中间形式与 Gompertz 式略有颠倒，这种颠倒可以试着从方程形式的复杂程度上加以解释。另外，考察生长方程的参数个数时发现，Richards 生长方程有 3 个参数，精度较其他 5 种 2 参数方程要高，虽然拟合时所需的时间相对较长，但其解释林分生长情况的能力强。

3.1.4　Richards 方程参数与林分因子间关系的探讨

上述六种生长函数中表现最优的是 Richards 生长函数，该函数的各参数如前所述具有明确的数学及生物学意义，对此，日本学者石川善郎(1998)曾做过探讨，并得出 Richards 生长函数参数 k、m 与林分年龄、平均直径及直径离散度的相关关系，指出参数 k 与年龄的相关系数较参数 m 为大，参数 m 与平均直径、直径离散度相关性不紧密，而参数 k 与平均直径、直径离散度存在较紧密的线性相关。为

进一步探明 Richards 生长函数应用于林分直径结构分析时其参数的表现意义，这里对 Richards 函数参数与林分生长因子——年龄、立地、密度、断面积平均直径和平均树高的关系做了较为详细的研究。

3.1.4.1 基本数据和方法

基本数据包括由导向曲线法所求算出的各样地立地指数值、采用林分直径累计分布拟合得到的 Richards 生长函数各参数值以及林分调查因子——年龄、株数密度、平均直径、平均树高等的调查资料，本文平均直径采用林分断面积平均直径，散点图 3-1、图 3-2 分别描述了所有 491 块样本数平均直径、平均树高随年龄的生长变化。将以上 3 参数及 5 个林分因子材料集成建立数据文件后，应用 SAS 之多元回归法、逐步回归法找出对函数参数有显著影响的林分因子，进而采用线性、非线性回归法及图解法寻求 Richards 生长函数参数与林分生长因子间的关系。

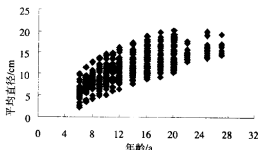


图 3-1 平均直径随年龄的变化趋势

Fig. 3-1 The variability of average diameter with age

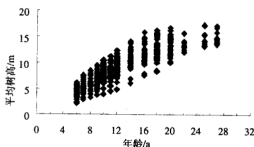


图 3-2 平均树高随年龄的变化趋势

Fig. 3-2 The variability of average height with age

3.1.4.2 结果与分析

(1) Richards 方程参数与各因子相关性的总体评价

首先利用多元线性回归法进行分析，发现有林分因子(自变量)对参数(因变量)的回归系数经 T 检验表现出不显著，故直接采用逐步回归法，根据相关性从大到小逐步筛选出对参数有显著影响的林分因子，从而得到最优回归组合，为对参数意义的进一步探讨奠定有效的基础。逐步回归结果如表 3-8 所示。

表 3-8 Richards 函数参数与各林分因子间的逐步回归分析

Table 3-8 The stepwise regression analysis between Richards' parameters and stand factors

方程参数	林分因子	回归系数	偏相关系数	模型相关系数	*Prob>F*
$k(y_1)$	年龄(x_1)	−0.049 333	0.7250	0.7250	0.0001
	立地指数(x_2)	−0.041 229	0.1752	0.7459	0.0001
	平均直径(x_3)	0.020 663	0.0819	0.7503	0.0063
	密度(x_4)	0.000 015	0.0721	0.7539	0.0155
回归方程	$y_1 = 1.747\ 326-0.049\ 333\ x_1-0.041\ 229\ x_2+0.020\ 663\ x_3+0.000\ 015\ x_4$; $R = 0.7539$				
$m(y_2)$	年龄(x_1)	−0.041 101	0.3903	0.3903	0.0001
	平均直径(x_2)	0.209 355	0.1179	0.4077	0.0046
	平均树高(x_3)	−0.246 560	0.2119	0.4595	0.0001
	密度(x_4)	0.000 061	0.086	0.4674	0.0324
回归方程	$y_2 = 2.563\ 080-0.041\ 101\ x_1+0.209\ 355\ x_2-0.246\ 560\ x_3+0.000\ 061\ x_4$; $R = 0.4674$				
$b(y_3)$	平均直径(x_1)	31 749 153.6841	0.0922	0.0922	0.0416
	平均树高(x_2)	−27 362 158.4948	0.1418	0.1688	0.0016
	密度(x_3)	10 243.7325	0.0678	0.1819	0.1297
回归方程	$y_3 = -130\ 633\ 926.1428-31\ 749\ 153.6841\ x_1-27\ 362\ 158.4948\ x_2+10\ 243.7325\ x_3$; $R = 0.1819$				

表 3-8 中与方程各参数相关的林分因子均为自上而下依次被选入回归模型，被选入的林分因子意味着对参数存在显著性影响，其对参数的显著性影响程度采用偏相关系数进行衡量，因为没有规定变量进入模型和留在模型的显著水平，而是按照预置的取 0.15，故参数 b 的回归模型中包含密度这一林分因子，F 检验结果表明，表中所列出的各林分因子在 0.15 水平是显著的。

由表 3-8 可以看出：对参数 k 存在显著性影响的林分因子由大到小有年龄、立地指数、平均直径、密度，回归方程相关系数较高，达 0.7539，而且 k 与年龄的相关性比较高；对参数 m 存在显著性影响的林分因子依次有年龄、平均树高、平均直径、密度，回归方程相关系数没有参数 k 的高；对参数 b 存在显著性影响的林分因子依次有平均树高、平均直径、密度，回归模型相关系数较低。鉴于这样一个初步结论，本文着重讨论 Richards 生长方程参数 k、m 与林分因子间的关系，对参数 b 这里暂不做进一步探讨。

(2) 参数 k、m 与各林分因子间的关系

1) 参数 k、m 与年龄的关系

为寻求 Richards 生长方程参数 k、m 与年龄的关系，做散点图 3-3、图 3-4，并分别做出趋势线如图 3-3 所示。

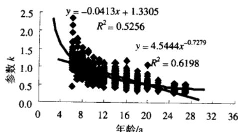


图 3-3 参数 k 与年龄的关系

Fig. 3-3 The relation between parameter k and age

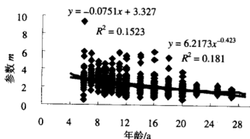


图 3-4 参数 m 与年龄的关系

Fig. 3-4 The relation between parameter m and age

由图 3-3、图 3-4 可以看出参数 k、m 与年龄均呈负相关，总体上随着林分的生长，两参数值为趋势性下降，后期相对前期其下降趋势减缓，且参数 k 下降趋势较参数 m 更明显，前文所述逐步回归结果也说明了这一现象。参数 k 与年龄的直线回归式为 $k = -0.0413t+1.3305$，相关系数为−0.7250， 检验统计量 F 值 $= 541.756$，概率 P 值 $Prob>F = 0.0001<0.01$，说明拟合效果极显著，因此参数 k 与年龄为极显著线性相关。参数 m 与年龄的直线回归式为 $m = -0.0751t+3.327$，其相关系数为−0.3903，检验统计量 F 值 $= 87.879$，概率 P 值 $Prob>F = 0.0001<0.01$，说明拟合效果极显著。为进一步探讨参数 k、m 与年龄的相关性，本文选用了几种非线性函数，结果表明两参数与年龄均存在较线性更紧密的非线性函数关系，SAS 软件分析结果表明非线性方程中，方程 $y = ax^b+c/\exp(x)$ 表征性最好，幂函数其次。然而，在采用 Excel 电子表格统计功能时发现，同样是幂函数关系，后者显示出的相关指数比前者要高，较前者之最优还高。为直观及方便比较，下面幂函数相关指数均采用 Excel 统计结果。参数 k 与年龄的幂函数关系为 $k = 4.5444t^{-0.7279}$，相关系数为−0.7873(SAS 统计结果为 0.7735，最优函数为 0.7756)；参数 m 与年龄的幂函数关系为 $m = 6.2173t^{-0.423}$，相关系数为−0.4254。非线性相关结果也表明参数 m 与年龄的相关性较参数 k 低，这一结果与石川善郎(1998)研究结论相似。

Richards 生长方程中，k 为与生长速度有关的参数，在林分直径累积分布曲线上意味着累积百分比的累积速度，研究参数 k 与年龄的关系意义较大，其值的变

动情况可反映出林分生长的动态变化状况。下面就立地、密度及间伐等人为控制因子对参数 k 与年龄间关系的影响做较深入的探讨。图 3-5、图 3-6、图 3-7、图 3-8、图 3-9、图 3-10 描述了三控制因子的作用情况。

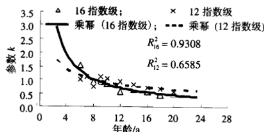


图 3-5　不同立地时参数 k 与年龄的关系(2m×3m)

Fig. 3-5　The relation between parameter k and age in the circumstances of different site indices(2m×3m)

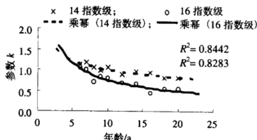


图 3-6　不同立地时参数 k 与年龄的关系(2m×1.5m)

Fig. 3-6　The relation between parameter k and age in the circumstances of different site indices(2m×1.5m)

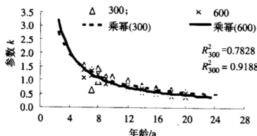


图 3-7　不同密度时参数 k 与年龄的关系

Fig. 3-7　The relation between parameter k and age in the circumstances of different densities

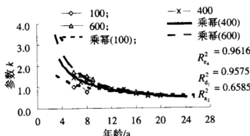


图 3-8　不同密度时参数 k 与年龄的关系

Fig. 3-8　The relation between parameter k and age in the circumstances of different densities

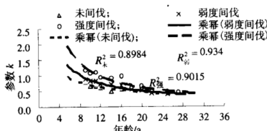


图 3-9　不同间伐作业时参数 k 与年龄的关系

Fig. 3-9　The relation between parameter k and age in the circumstances of different thinning intensities

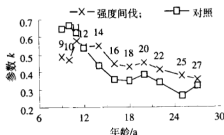


图 3-10　不同间伐作业时参数 k 与年龄的关系

Fig. 3-10　The relation between parameter k and age in the circumstances of different thinning intensities

图 3-5、图 3-6 描述了不同立地指数时参数 k 与年龄的关系。图 3-5 为年株林场密度试验林 a_1、a_2 小区，初植密度为 100 株/600m^2，立地指数分别为 15.88、12.52，分属 16 和 12 指数级。由图 3-5 可知相同密度情况下立地指数高的林分参数 k 随年龄的变化趋势下降得更快(图 3-5 中实线为高立地指数时的趋势线)，幂函数相关指数更大，且生长前期参数 k 值较低立地指数林分高，但越过一定的年龄，其参数 k 值反而要小。图 3-6 为密度试验林的 b_2、b_3 小区，初植密度为 200 株/600m^2，立地指数分别为 14.52、16.92，分属 14 及 16 指数级。图 3-6 说明了与图 3-5 相同的道理。同时，比较两图亦可看出，随着密度的加大，高指数与低指数这两条曲

线的交点向左移动，亦即参数 k 相等时的林分年龄出现得更早了。

图 3-7、图 3-8 描述了不同密度时参数 k 与年龄的关系。图 3-7 为年株林场密度试验林，林分初植密度分别为 300 株/600m^2、600 株/600m^2，立地指数级均为 14。图 3-7 显示出相同立地指数时高密度的林分参数 k 随年龄的变化趋势下降得更快(图 3-7 中实线为高密度时的趋势线)，幂函数相关指数更大，且生长前期参数 k 值较低密度林分高，但越过一定的年龄，其参数 k 值反而要小。图 3-8 为密度试验林的 a_2、d_1 及 e_4，立地指数分别为 12.52m、12.88m、12.14m，初植密度分别为 100 株/600m^2、400 株/600m^2、600 株/600m^2。图 3-8 反映了同样的道理。比较两图亦可看出，随着立地指数的减小，高密度与低密度这两条曲线的交点向右移动，亦即参数 k 相等时的林分年龄延后了。

图 3-9、图 3-10 描述了间伐作业时参数 k 与年龄的关系。图 3-9 为山下林场间伐试验林 B 区组的 b_1、b_2、b_4 小区，分别为对照、弱度间伐、强度间伐林分，立地指数级均为 14。由图 3-9 可知，在林分被间伐处理后，对照、弱度间伐以及强度间伐林分参数 k 值依次加大，间伐林分参数 k 值较未间伐林分一直更大，但随着林分年龄的增长，三种作业方式 k 值间的差值逐渐减小，最终均趋向于最小。图 3-10 验证了这一现象。图 3-10 为间伐试验林 D 区组的 d_2、d_3 小区，立地指数分别为 16.32m、16.5m，同属 16 指数级，分别为强度间伐及对照林分，该折线图 3-10(数据点为菱形表示强度间伐)清楚地表明强度间伐后，参数 k 值在一定时间段内呈增大状态，但总体上，随着时间的推移，其值逐渐减小，这表明间伐能一定程度上提高参数 k 值，延缓 k 值下降的趋势。

参数 m 由于与年龄的相关性不如参数 k 那么紧密，故在不同密度、不同立地、不同间伐作业情况下表现出的规律性不很明显，但也并不紊乱。

图 3-11、图 3-12、图 3-13 分别描述了以上三种情况下参数 m 与年龄的典型关系。

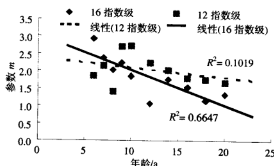


图 3-11　不同立地时参数 m 与年龄的关系

Fig. 3-11　The relation between parameter m and age in the circumstances of different site indices

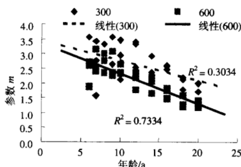


图 3-12　不同密度时参数 m 与年龄的关系

Fig. 3-12　The relation between parameter m and age in the circumstances of different densities

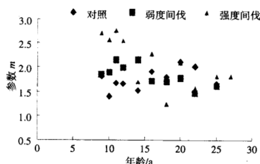


图 3-13　不同间伐强度时参数 m 与年龄的关系

Fig. 3-13　The relation between parameter m and age in the circumstances of different thinning intensities

图 3-11、图 3-12、图 3-13 分别选用的样地与图 3-5、图 3-7、图 3-9 一致。从图 3-11 中可看出相同密度情况下立地指数高的林分参数 m 随年龄的变化趋势下降得更快(图 3-11 中实线为高立地指数时的趋势线)，线性相关指数更大，且生长前期参数 m 值较低立地指数林分高，但越过一定的年龄，其参数 m 值反而要小。

图 3-12 描述不同密度时参数 m 与年龄的关系，表明相同立地指数时高密度的林分参数 m 随年龄的变化趋势下降得更快(图 3-12 中实线为高密度时的趋势线)，线性函数相关指数更大，在一定的年龄后(这里约为 10 年)，高密度林分较低密度林分的 m 值表现要小。

图 3-13 描述了不同间伐作业时参数 m 与年龄的关系，显示出间伐对参数 m 的影响没有对参数 k 那么明显，但从图 3-13 中亦可看出强度间伐、弱度间伐及对照林分一定年龄(正好为间伐时林分的年龄)前参数值 m 是依次减小，该年龄后，m 值变化就不稳定了。对照林分中 m 值表现为增大，估计这也是造成 m 与年龄相关性不紧密的原因。

2) 参数 k、m 与平均直径的关系

为寻求 Richards 生长方程参数 k、m 与平均直径的关系，做散点图 3-14、图

3-15，并分别做出趋势线如下所示。

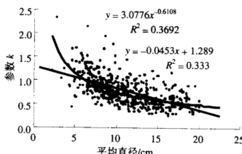


图 3-14 参数 k 与平均直径的关系

Fig. 3-14 The relation between parameter k and average diameter

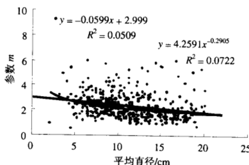


图 3-15 参数 m 与平均直径的关系

Fig. 3-15 The relation between parameter m and average diameter

图 3-14、图 3-15 为 491 块样本数拟合所得的总体参数 k、参数 m 与平均直径间的关系。由以上两图可以看出参数 k、m 与平均直径均呈负相关，总体上随着林分的生长，两参数值为趋势性下降，后期较前期下降幅度减缓，且参数 k 下降趋势较明显，而参数 m 下降趋势微弱。参数 k 与平均直径的直线回归式为：$k = -0.0453d + 1.289$，这里 d 表示平均直径，相关系数为-0.5771，检验统计量 F 值 =244.089，概率 P 值 $Prob>F = 0.0001<0.01$，说明拟合效果极显著，因此参数 k 与平均直径为极显著线性相关。参数 m 与平均直径的直线回归式为：$m = -0.0599d+2.999$，其相关系数为-0.2256，检验统计量 F 值 = 26.232，概率 P 值 $Prob>F = 0.0001<0.01$，说明拟合效果极显著。为进一步探讨参数 k、m 与平均直径的相关性，本文选用了几种非线性函数，结果表明两参数与平均直径均存在较线性略微紧密的非线性函数关系，参数 k 与平均直径的幂函数关系为：$k = 3.0776d^{-0.6102}$，相关系数为-0.6076；参数 m 与平均直径的幂函数关系为：$m = 4.2591d^{-0.2905}$，相关系数为-0.2687。非线性相关结果表明参数 m 与年龄的相关性较参数 k 低。为探讨立地、密度及间伐等人为控制因子对参数与平均直径间

关系的影响，下面做了进一步的探讨，鉴于参数 m 与平均直径的相关性较低，下面仅就参数 k 进行分析。图 3-16 至图 3-22 描述了三控制因子的作用情况。

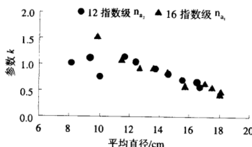


图 3-16 不同立地指数时参数 k 与平均直径的关系

Fig. 3-16 The relation between parameter k and average diameter in the circumstances of different site indices

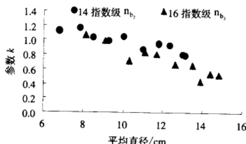


图 3-17 不同立地指数时参数 k 与平均直径的关系

Fig. 3-17 The relation between parameter k and average diameter in the circumstances of different site indices

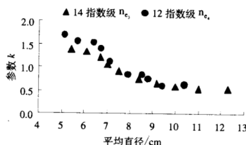


图 3-18 不同立地指数时 k 与平均直径的关系

Fig. 3-18 The relation between parameter k and average diameter in the circumstances of different site indices

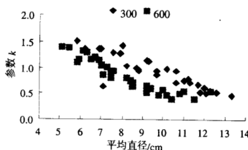


图 3-19 不同密度时 k 与平均直径的关系(14 指数级)

Fig. 3-19 The relation between parameter k and average diameter in the circumstances of different densities(site index—14m)

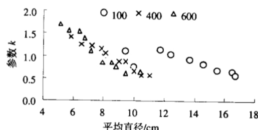


图 3-20 不同密度时 k 与平均直径的关系(12 指数级)

Fig. 3-20 The relation between parameter k and average diameter in the circumstances of different densities(site index—12m)

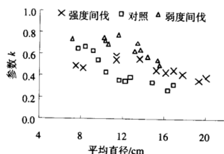


图 3-21 不同间伐作业时 k 与平均直径的关系(14 指数级)

Fig. 3-21 The relation between parameter k and average diameter in the circumstances of different thinning intensities(site index—14m)

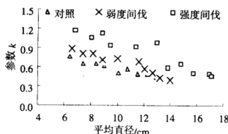


图 3-22 不同间伐作业时 k 与平均直径的关系(16 指数级)

Fig. 3-22 The relation between parameter k and average diameter in the circumstances of different thinning intensities(site index—16m)

图 3-16、图 3-17、图 3-18 描述了不同立地指数时参数 k 与平均直径的关系。图 3-16、图 3-17 分别选用的样地与图 3-5、图 3-7 一致，图 3-18 为年株林场密度试验林 e_3 小区及 e_4 小区，初植密度均为 600 株/600m^2，立地指数分别为 13.85m、12.14m，分属 14、12 指数级。从图 3-17、图 3-18 可以清晰地看出，相同密度情况下立地指数高的林分较立地指数低的林分 k 值低，即立地指数愈大，k 值愈小，立地指数小的林分 k 值高，这表明立地指数对参数 k 与平均直径的关系影响显著。图 3-16 中立地的影响不很明确，但总体上也存在此种关系。幂函数趋势线表明立地指数高的林分参数 k 随平均直径的变化趋势下降得更快(为使实际数据点更清晰，趋势线未在各图中标出)，高立地指数时两者相关系数更高。

图 3-19、图 3-22 分别选用的样地与图 3-7、图 3-8 一致，描述了不同密度时参数 k 与平均直径的关系。图 3-19 为年株林场密度试验林，林分初植密度分别为 300 株/600m^2、600 株/600m^2 (即图 3-19 中所示的低密度与高密度)，立地指数级均为 14。图 3-19 非常清楚地显示出相同立地指数时低密度的林分参数 k 较高密度林分 k 大，即密度愈小，k 值愈大。图 3-20 显示，在一定的直径生长量后，林分 k 值亦开始呈现图 3-19 的变化情况，密度小的 a_2(100 株/600m^2)林分参数 k 值要高于密度大的 d_1(400 株/600m^2)、e_4(600 株/600m^2)，而 d_1、e_4 均为较高的密度，两者间 k 值差异不大。幂函数趋势线表明高密度时 k 值与平均直径相关系数更高。因此，可以得出这样一个结论，即密度对林分 k 值与平均直径的关系具有显著性影响。

图 3-21、图 3-22 描述了间伐作业时参数 k 与平均直径间的关系。图 3-21 选用林分与图 3-2 一致，图 3-22 为山下林场间伐试验林 D 区组的 d_2、d_3、d_4 小区，立地指数分别为 16.32m、16.5m、15.65m，同属 16 指数级，分别为强度间伐、对照、弱度间伐林分。由图 3-21 可以明确地看到，对照、弱度间伐以及强度间伐林分随平均直径变化的参数 k 值依次增大。据图 3-22 可知，在一定直径生长量后(约为林分被间伐处理后)，间伐林分参数 k 值较未间伐林分为大，该图中弱度间伐处理 k 值表现最大，这可能是因其实际立地指数值相对要小，而这种结果又与前述的有关立地的影响情况一致。另外，考察强度间伐林分 d_2，在间伐年期间及其后一段

时间内，k 值有明显的上扬趋势，这一点从图 3-21 中的强度间伐林分 b_4 上也可清晰地看到。总之，间伐作业对林分参数 k 与平均直径的关系有着明显的影响。

3) 参数 k、m 与密度的关系

图 3-23、图 3-24 分别描述了参数 k、m 与密度的关系。

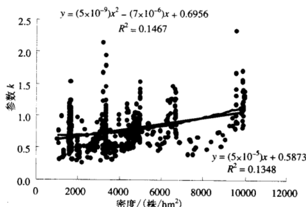


图 3-23　参数 k 与密度的关系

Fig. 3-23　The relation between parameter k and density

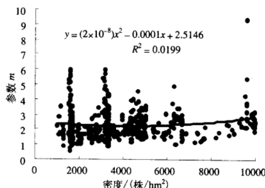


图 3-24　参数 m 与密度的关系

Fig. 3-24　The relation between parameter m and density

由上述两图可以看出参数 k、m 与密度均呈正相关，总体上随着密度的增大，两参数值为趋势性上升，且参数 k 上升趋势较明显，而参数 m 上升趋势微弱。参数 k 与密度的直线回归式为：$k=(5\times10^{-5})n+0.5873$，这里 n 表示株数密度，相关系数为 0.3672，经 F 检验证明拟合效果极显著，因此参数 k 与密度为显著性线性相关。参数 m 与密度的直线回归式的相关系数较低，为 0.0933，检验统计量 F 值 = 4.316，概率 P 值 $Prob>F = 0.0383<0.05$，说明拟合效果显著。非线性函数拟合结果表明两参数与密度均存在较线性略微紧密的非线性函数关系，其中又以二次多项式效果较好，参数 k 与密度的多项式关系为：

$k=(5\times10^{-9})n^2-(7\times10^{-6})n+0.6956$，相关系数为 0.383；参数 m 与密度的多项式关系为：$m=(2\times10^{-8})n^2-0.0001n+2.5146$，相关系数为 0.1411。非线性相关结果表明，参数 m 与年龄的相关性较参数 k 为低。

4) 参数 k 与立地的关系

逐步回归结果表明参数 k 与立地的关系较为紧密，图 3-25 描述了这种关系。

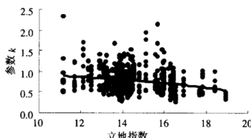


图 3-25　参数 k 与立地的关系

Fig. 3-25　The relation between parameter k and site index

由图 3-25 可以看到，参数 k 随立地指数的增大呈现下降趋势，即立地指数愈大，参数 k 值愈小。两者间的直线回归式相关系数为 0.2272，检验统计量 F 值 = 26.623，概率 P 值 $Prob>F=0.0001<0.01$，说明呈极显著线性相关。非线性函数拟合结果表明参数与立地存在较线性略微紧密的非线性函数关系，其中又以二次多项式效果较好，其相关系数为 0.2532。

5) 参数 m 与平均树高的关系

图 3-26 描述了参数 m 与平均树高的关系。

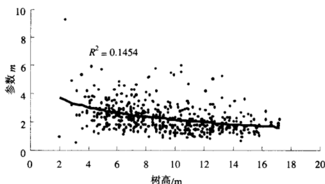


图 3-26　参数 m 与平均树高的关系

Fig. 3-26　The relation between parameter m and average height

图 3-26 表明，参数 m 随平均树高的增大呈现下降趋势，平均树高愈大，林分生长的时间愈长，参数 k 值愈小。两者间的直线回归式相关系数为 0.3655，检验统计量 F 值 = 75.412，概率 P 值 $Prob>F=0.0001<0.01$，说明呈极显著线性相关。

非线性函数拟合结果表明参数与立地存在较线性略微紧密的非线性函数关系，其中对数关系拟合效果较好，其相关系数为 0.3813。

3.1.5 结论

1) 应用于林分直径累积分布的模拟研究时，Richards、Weibull 等 6 种生长方程的微分式可以理解为：直径累积频率的增长量(dy/dx)正相关于累积频率而受到最大频率的限制，并且这种限制可为线性亦可为非线性。

2) 6 种生长方程的参数均在一定范围内变化且具有各自的主要分布区间。在描述林分直径累积分布时，Richards 方程表现为 Logistic 型的情形达 98%；Weibull 方程的参数 c 均大于 1，曲线存在拐点。

3) 除 Mitscherlich 式外，各生长方程模拟的精度均相当高，Richards、Weibull、Logistic、Gompertz、Mitscherlich、Korf 等 6 种生长方程选优率依次降低。

4) Richards、Logistic、Weibull、Gompertz、Korf 及 Mitscherlich 等 6 种生长方程总体精度依次降低，Richards 方程模拟精度依次为其后 5 种方程精度的 1.5、1.6、2.6、4.2、9.5 倍。相对生长率表现为变量指数函数的方程的精度要较相对生长率表现为变量幂函数的方程的精度为高，且 3 参数方程的精度较 2 参数方程的高；当 Weibull 函数作为生长方程应用时其模拟性能较好。

5) 逐步回归结果表明，对 Richards 函数参数 k 存在显著性影响的林分因子由大到小有年龄、立地指数、平均直径及密度，对参数 m 存在显著性影响的林分因子依次有年龄、平均树高、平均直径及密度，但回归方程相关系数没有参数 k 的高；对参数 b 存在显著性影响的林分因子依次有平均树高、平均直径及密度，回归模型相关系数较低。

6) Richards 函数参数 k 和 m 与年龄均存在显著的负的线性和非线性关系，而非线性相关性更强，无论线性还是非线性，k 与年龄的相关性较 m 要强。它们的这种相关关系受立地、密度及间伐作业的影响。立地指数大、密度高时两参数与年龄的相关性更高；相对于立地指数小、密度低时，两参数均是先小后大。间伐对参数 k 的影响较 m 为大，且间伐能一定程度上提高 k 值。

7) Richards 函数参数 k、m 与平均直径均存在显著的负的线性和非线性关系，而非线性相关性更强。立地指数愈大或密度愈高，参数 k 值愈小，但间伐强度愈大，参数 k 值愈大。

8) Richards 函数参数 k、m 与密度均呈显著正相关，总体上随着密度的增大，两参数值为趋势性上升，且参数 k 上升趋势较明显。

9) Richards 函数参数 k、参数 m 分别随立地指数、平均树高的增大呈现下降趋势，且均呈极显著线性相关。

3.2 理论生长方程对杉木人工林林分直径结构的模拟研究

生长方程作为描述一种有机体或一个种群大小随年龄变化的模型，可以反映某些生物生长的规律性(Zeide 1993)。从数学角度讲，若一个方程中包含 3 个或更多自由参数，差不多任何曲线都可以逼近。显而易见，若方程参数个数与观察数据点数目相等，则任何方程均可以通过所有数据点，这样，方程的灵活性虽达到理想状态，但同时方程也就失去了描述树木特定生长趋势的性能。而且，方程的参数个数不可能任意增加，实际上，方程的参数往往并不多，参数个数比较接近，那么方程间模拟精度的差异究竟是如何产生的呢？这里可以从林分及方程两个方面寻找原因，一般意义上，对于相同的方程而言，不同的林分数据拟合所得到的精度不尽相同，对于同一组林分数据，不同的方程模拟的精度亦会存在一定的差异，林分数据和方程表达形式的差异决定了方程模拟精度的高低。

人工林是指通过植树造林或通过苗木进行森林更新而建成的林分，这些林分或全部是外来树种造林，或是集约栽培经营的乡土树种造林，而且具有不超过 2 个树种、同龄和造林模式规范 3 个共同特征(FAO 1998)。人工林经营的目的就是要达到定向、速生、丰产、优质、稳定及高效(盛炜彤 1996)。为实现这一目的，国际上通常采用遗传控制、立地控制、密度控制等三大控制和适度人为干扰(主要为间伐)以及维持地力为主体的培育、经营措施(张建国 2000)，这些措施一定程度上决定了林分的生长发育进程和林分生长特征。因此，对于模拟的一方——林分而言，研究影响林分构成特征的这些措施对模拟精度的作用程度是林分直径结构模拟的重要课题，而以往在这方面的研究是很不够的。应用“S”形生长方程描述林分直径累积百分比分布正受到国内外学者的重视(吴承祯 1998，Gadow 1998，ISHIKAWA 1998，惠刚盈 1995)，并被证明是一种可靠而有效的方法。然而，就模拟的另一方——生长方程来说，理论生长方程在描述林分直径分布时所表现出精度高低的实质原因一直未能给出很好的解答。鉴于此，本文从理论生长方程曲线拐点的角度进行了探讨，期望能给出这一问题的满意回答。

3.2.1 材料与方法

3.2.1.1 试验材料

材料见 3.1 节的相关内容。

3.2.1.2 研究方法

本研究采用概率密度函数中运用最广的 Weibull 分布函数(Bailey 1973)及理论生长方程中的 Gompertz(Gompertz 1825)、Mitscherlich(Mitscherlich 1919)、Logistic(Verhulst 1838)、Richards(Richards 1959)和 Korf(Kiviste 1988)等 6 种不同的生长方程对林分直径累积分布进行模拟，各生长方程之基本形态详见表

3-9。采用残差平方和(RSS)和剩余标准差(SER)评价各生长方程的模拟精度，采用直观分析和图示法分别研究年龄、立地、密度及间伐强度等因子和生长方程对模拟精度的影响程度。

表 3-9 各生长方程之基本形态

Table 3-9 The basic form of every growth equation

方程(equation)	表达式(expression)	拐点(inflection point)	参数范围(range of parameter)
Mitscherlich	$y=1-le^{-mx}$	无	l，$m>0$
Gompertz	$y=\exp(-e^{a-bx})$	1/e	a，$b>0$
Logistic	$y=1/(1+e^{p-qx})$	1/2	p，$q>0$
Richards	$y=(1-be^{-kx})^{\frac{1}{1-m}}$	$m^{\frac{1}{1-m}}$	b，k，$m>0$
Korf	$y=\exp(-b/x^c)$	$\exp(-1-1/c)$	b，$c>0$
Weibull	$y=1-\exp[-(x/b)^c]$	$1-\exp(1/c-1)$	b，$c>0$

3.2.2 生长方程在不同年龄、立地、密度、间伐强度时模拟效果之评价

为评价不同林分状况及生长方程对模拟精度的影响的强弱程度，本文按年龄、立地、密度以及间伐强度对林分依次进行了分类，并分别统计了各理论生长方程的模拟精度，详见表 3-10。由于不同年龄间、不同密度间的林分个数相等，表 3-10 中精度数据为总剩余标准差，不同立地、不同间伐强度时表 3-10 中数据为平均剩余标准差。

表 3-10 不同林分状态时各生长方程模拟精度统计表

Table 3-10 The modeling precision of every growth equation in the circumstances of different stand states

林分因子(stand factor)		方程(equation)					
		Logistic	Gompertz	Richards	Korf	Weibull	Mitscherlich
年龄* (age)	6	0.274 0	0.432 0	0.214 8	0.702 3	0.262 5	1.821 9
	12	0.279 8	0.635 5	0.188 8	0.932 3	0.237 4	2.525 5
	20	0.305 1	0.662 0	0.182 3	0.862 0	0.266 1	2.445 0
立地** (site index)	12	0.015 4	0.030 1	0.009 8	0.050 8	0.016 3	0.117 9
	14	0.021 2	0.038 2	0.014 0	0.062 5	0.021 2	0.130 8
	16	0.023 9	0.038 9	0.015 3	0.056 8	0.025 7	0.148 4
	18	0.023 2	0.030 3	0.016 2	0.048 5	0.023 7	0.121 7

续表

林分因子(stand factor)		方程(equation)					
		Logistic	Gompertz	Richards	Korf	Weibull	Mitscherlich
初植密度* (initial planting density)	100	0.6258	1.0908	0.5307	1.4077	0.6336	5.9662
	200	0.5864	1.3116	0.3545	1.7326	0.5147	5.2613
	300	0.6535	1.3501	0.4458	1.9830	0.5078	4.6627
	400	0.5017	1.2405	0.3511	1.9199	0.4253	4.3470
	600	0.5195	1.0509	0.3477	1.7787	0.4385	3.5560
间伐强度** (thinning intensity)	对照	0.0209	0.0328	0.0178	0.0581	0.0153	0.1152
	弱度	0.0200	0.0312	0.0173	0.0540	0.0182	0.1171
	中度	0.0204	0.0299	0.0171	0.0532	0.0200	0.1035
	强度	0.0248	0.0308	0.0171	0.0491	0.0261	0.1162

*表示精度值为总剩余标准差。
Present that precision value is total SER.
**表示精度取值为平均标准差。
Present that precision value is average SER.

为使统计数据更直观，作图 3-27 如下。

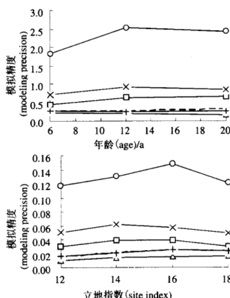


图 3-27 不同年龄、立地、密度、间伐强度时各生长方程模拟精度示意图

Fig. 3-27 The modeling precision of every growth equation in the circumstances of different ages, site indices, initial planting densities and thinning intensities

– – –Logistic；—□—Gompertz；—△—Richards；—× —Korf；— + —Weibull；—○—Mitscherlich

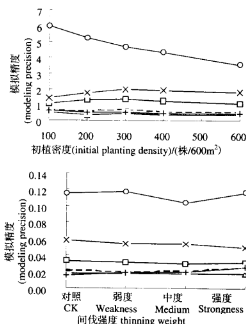


图 3-27　不同年龄、立地、密度、间伐强度时各生长方程模拟精度示意图(续)

Fig. 3-27　The modeling precision of every growth equation in the circumstances of different ages, site indices, initial planting densities and thinning intensities(Continued)

———Logistic；—□—Gompertz；—△—Richards；—×—Korf；—+—Weibull；—○—Mitscherlich

由表 3-10 和图 3-27 可以看出，总体上，对于 Richards 等 6 个生长方程中的每一个方程而言，不同年龄、不同立地、不同初植密度以及不同间伐强度情形下，方程模拟精度均存在一定差异，这种差异是由于模拟对象即具体林分直径分布不一致所引起的，然而此种差异表现相当微弱；而当林分处于相同的各种状态时，不同生长方程间整体上模拟精度差异均十分明显。相对由不同生长方程所引起的模拟精度差异，林分自身所造成的模拟精度差异是微弱的，前者起主要作用。因此，就必须对生长方程造成模拟精度高低的实质原因做进一步的探讨。

3.2.3 生长方程模拟精度高低产生之原因的探讨

对于理论生长方程来说，方程的拐点至关重要，且具有非常明确的生物学意义。一方面，拐点为生长方程曲线凹凸性状的分界点，决定着方程的形状；另一方面，树木的生长在理论上呈“S”形曲线，拐点处意味着连年生长的高峰期(盛炜彤等　1996)，由分化所引起的林木径阶株数累积分布也呈现“S”形状态，拐点具体表示直径累积频率变化量最大时刻。在进行数据实际拟合时，生长方程曲线的拐点将对拟合的精度产生重要的影响。因此，研究不同生长方程模拟精度高低产生的原因时，方程的拐点差异就有条件成为探讨的突破点。

3.2.3.1　生长方程模拟精度的比较

表 3-7 为 Richards 等 6 种生长方程模拟精度的比较结果。从表 3-7 中可知，6 种生长方程的总体精度大小依次为 Richards、Logistic、Weibull、Gompertz、Korf 、Mitscherlich。

3.2.3.2　各生长方程的拐点分布情形

经过模拟发现各生长方程拐点分布情形如表 3-11 所示。

表 3-11　各生长方程的拐点分布情形*

Table 3-11　The distribution of inflection points of equations

名称(name)	Mitscherlich	Gompertz	Logistic	Korf			Weibull				
范围(range)	无	1/e	0.5	0.1906~0.3489			0.2455~0.6001				
分布(distribution)	/	1/e	0.5	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7
比例(proportion)	/	100%	100%	0.2%	55.6%	44.2%	0.41%	3.46%	18.74%	77.19%	0.2%

名称(name)	Richards						林分(stand)					
范围(range)	0.2621~0.7643						0.2621~0.7643					
分布(distribution)	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8
比例(proportion)	0.2%	5.5%	38.7%	43.59%	11.81%	0.2%	0.2%	5.91%	31.36%	50.92%	11.41%	0.2%

* 由最优模拟方程所描述的林分理论分布情形。

Stand theoretical distribution described by the best modeling equation.

对于单个林分而言，最优模拟方程能精确地反映林分的实际直径分布状况，故将最优模拟方程所描述的分布情况当作林分的理论分布情形，其拐点作为林分理论分布的拐点，为方便描述，简称林分拐点。可以看出林分直径累积分布曲线拐点存在一个范围，其主要分布区间为 0.4~0.6，这一区间所占比例高达 82.28%，这说明绝大多数样本实测值的拐点在 0.4~0.6 间出现。Richards、Korf 及 Weibull 等 3 个生长方程最佳拟合曲线的拐点亦具有一个浮动范围，并非为定值，且均存在如表 3-11 所示的主要分布区间；Logistic 和 Gompertz 方程拐点固定；Mitscherlich 方程不存在拐点。

3.2.3.3　有无拐点方程间模拟精度的比较

表 3-11 中所列 6 种生长方程除 Mitscherlich 式不存在拐点外，其他方程均存在拐点。统计可得，Richards、Logistic、Weibull、Gompertz、Korf 等方程的模拟精度分别为 Mitscherlich 方程的 74.7、36.2、33.4、12.9、5.5 倍。因此可以得出结论：有拐点的生长方程较无拐点的生长方程之模拟精度高。图 3-28 描述了 Richards、Korf、Mitscherlich 等 3 个方程理论值与实测值吻合程度的典型情况。

从图 3-28 中可以直观地看到，实测的直径累积百分比分布曲线具有拐点，Richards 与 Korf 两方程的模拟曲线也具有拐点，因而与实测值相当吻合，而

Mitscherlich 方程无拐点，致使其理论值与实测值相差较大，模拟精度也就较低。

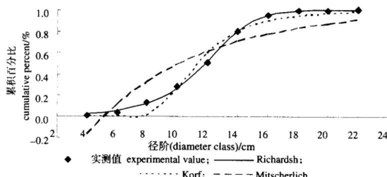


图 3-28　3 种生长方程理论值与实测值的比较

Fig. 3-28　The comparison of theoretical value and experimental value among three equations(Richards，Korf and Mitscherlich)

3.2.3.4　浮动拐点方程间模拟精度的比较

因为林分实测直径累积百分比曲线拐点具有一定变动范围，故模拟精度最高的生长方程应该是最佳拟合曲线拐点也具有一定变动范围的方程。Richards、Korf 及 Weibull 等 3 个生长方程最佳拟合曲线的拐点均具有一个浮动范围，3 方程与林分的拐点区间分布情况如图 3-29 所示。

由图 3-29 可以清晰地看到，Richards、Weibull 及 Korf 等 3 个生长方程最佳拟合曲线拐点的范围依次减小，结合表 3-9 显示的结果，能初步得出这样一个结论，即对于具有浮动拐点的生长方程而言，其最佳拟合曲线的拐点范围愈大，生长方程拟合的精度就愈高。拟合总体精度最高的 Richards 生长方程拐点范围与林分相同，而且，在 0.4~0.6 分布区间竟也出乎意料地完全相同，为 82.28%。Weibull 方程以前被人们所认识主要是以其概率密度函数形式出现，因该方程在形状参数 $c>1$ 时具有拐点，故本文将其看做生长方程进行应用，该方程在 0.4~0.6 这一区间的拐点存在比例达 95.93%，其拟合精度相当高；Korf 方程最佳拟合曲线的拐点浮动范围在 0.1906~0.3489 之间，这一结果与李凤日(1996)关于树木生长曲线(应用 Korf 方程时)的拐点出现在 $0\sim A/e$(A 为渐近值)之间的论点相一致，然而该方程模拟精度较 Richards 和 Weibull 均低很多，这主要是因为方程拐点浮动范围不在林分拐点的主要存在区间。为更好地解释这种现象，这里提出有效拐点区间的概念，即生长方程拐点与林分直径累积分布曲线拐点完全相同或十分接近的存在区域，有效拐点区间愈大，方程拐点的有效性就愈大。Richards 方程拐点分布范围宽、主要分布区间也与林分拐点主要存在区间一致，其有效拐点区间大，故模拟精度高。Weibull 方程拐点浮动范围略窄，分布在林分拐点主要存在区间的比重过大，其有效拐点区间略小，模拟精度较 Richards 略低。Korf 方程拐点虽存在一个浮动范围，但过窄，且拐点均在林分拐点主要存在区间(0.4~0.6)之外，因此其有效拐点区间小，

模拟精度也就较前两者低许多。

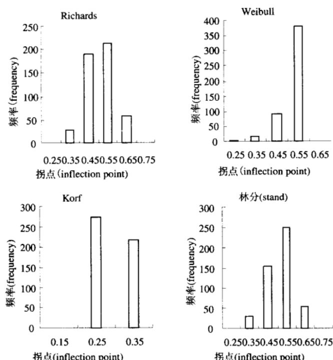


图 3-29 浮动拐点的区间分布图

Fig. 3-29 The regional distribution of the floating inflection points

3.2.3.5 固定拐点方程间模拟精度的比较

本文所列"S"形生长方程中拐点固定的方程有 Gompertz 和 Logistic，图 3-30 描述了两方程在林分直径累积分布曲线拐点散点图中的位置。

值得注意的是，Logistic 方程因其拐点固定，其拐点轨迹平行于 X 轴，拟合精度比较稳定，而且该方程拐点值(0.5)在前文所指出的林分拐点主要分布区间(0.4~0.6)之内，如图 3-30 所示，处于这一区间的核心区域，所以该方程具有良好的拟合性能。Gompertz 方程同理，但其拐点偏离了林分直径累积分布曲线拐点的主要存在区间，故精度要较 Logistic 方程为低。对于拐点固定的方程，可以将方程拐点处在林分拐点存在区间的位置以精确度进行衡量，精确度愈高，方程拟合精度愈高，如 Logistic 方程之拐点由于处在林分拐点主要存在区间的核心位置，因而拟合精度高。此种方程拐点的精确度亦可理解为方程拐点的有效性，精确度愈高，方程拐点有效性愈大。

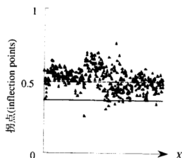


图 3-30 Gompertz 与 Logistic 方程拐点分布情形

Fig. 3-30 The distribution of inflection points of Gompertz and Logistic

------ Logistic； —— Gompertz

3.2.3.6 拐点固定的方程与拐点浮动的方程间模拟精度的比较

6 种理论生长方程中拐点固定的有 Logistic 和 Gompertz，拐点浮动的为 Richards、Korf 及 Weibull 等 3 个方程，如前所述，此 6 种方程的总体精度由大到小依次为 Richards、Logistic、Weibull、Gompertz、Korf、Mitscherlich。从精度大小的排序情况来看，不能说拐点浮动的方程模拟精度就比拐点固定的方程要高，反之，也行不通。可以发现，方程拐点落在林分直径累积分布曲线拐点主要分布区间的比重大时，方程模拟精度就高，如 Richards、Logistic 和 Weibull；拐点落在林分直径累积分布曲线主要分布区间之外的方程模拟精度就要低一些，如 Gompertz 及 Korf。据此，结合前面对方程在拐点固定与浮动两种情形下模拟精度的分析，可以认为，方程有效拐点区间愈大、拐点精确度愈高或有效性越大，其模拟精度愈高。Richards 方程的有效拐点区间包含了拐点精确度高的 Logistic 方程的拐点，故模拟精度高，Weibull 方程本来亦同理，但因个别样地拟合时精度误差较大，且与 Logistic 方程精度非常相近，从而导致较后者精度反而略低，此种情况属正常。Korf 方程拐点虽存在一个浮动范围，但这一范围偏离了林分拐点的主要分布区间，又因其分布范围上限值要小于 Gompertz 方程的拐点值 $(0.3489<0.3679)$，导致方程拐点有效性较 Gompertz 小，故模拟精度相对要低。

总地看来，理论生长方程最佳拟合曲线的有效拐点区间愈大，拐点精确度愈高，拐点有效性就愈明显，方程模拟精度就愈高。

3.2.4 结论

理论生长方程应用于林分直径结构领域的研究时，表现出了良好的模拟性能，但不同的理论生长方程其模拟精度又有高低之分。本文从模拟双方——林分和方程的角度对产生这一现象的原因进行了探讨，得出以下几点结论：

1) 年龄、立地、密度、间伐强度等因素对 Richards 等 6 种生长方程的模拟精度没有明显影响；相对由不同生长方程所引起的模拟精度的差异、林分自身所造

成的模拟精度差异是微弱的，前者起主要作用。

2）杉木人工林林分直径累积分布曲线的拐点存在一个范围，且有其主要分布区间 0.4~0.6。生长方程拐点的取值情形与各方程模拟精度的大小密切相关，具有拐点的方程模拟精度明显高于无拐点的方程。

3）理论生长方程最佳拟合曲线的有效拐点区间愈大，拐点精确度愈高，拐点有效性就愈大，方程模拟精度就愈高。

从本文研究结果来看，Richards、Weibull 及 Logistic 等 3 个方程模拟效果突出，可为以后其他树种的人工林或天然林林分直径结构模拟的研究提供参考。

参考文献

崔启武，Lawson. 1982. 一个新的种群增长数学模型——对经典的 Logistic 方程和指数方程的扩充.生态学报，2(4)：403~415

惠刚盈，盛炜彤. 1995. 林分直径结构模型的研究. 林业科学研究，8(2)：127~131

李久先. 1996. 三种生长模式在红桧人工林生长适用性之探讨. 中华林学季刊，29(2): 3~14

李文灿. 1990. 对 Logistic 方程的再认识. 北京林业大学学报，12(2)：121~127

孟宪宇. 1985. 使用 Weibull 分布对人工林油松林直径分布的研究. 北京林学院学报，1：30~39

盛炜彤. 1996. 杉木建筑材优化栽培模式研究总报告. 见：杉木建筑材优化栽培模式研究专题. 世界林业研究，9(专集)：32~53

童书振，盛炜彤，张建国. 2002. 杉木林分密度效应研究. 林业科学研究，15(1)：66~75

童书振. 1997. 杉木间伐中试林定位研究. 见：洪菊生，盛炜彤，吴金坤编. 速生丰产林培育研究报告选编，第四集. 北京：中国林业科学研究院世界银行贷款项目办公室，61~70

吴承祯，洪伟. 1998. 杉木人工林直径结构模型的研究. 福建林学院学报，18(2)：110~113

张建国，童书振，盛炜彤. 2000. 杉木不同立地不同密度林分材种结构变化规律研究. 见：张建国. "九五"国家攻关专题杉木建筑材树种遗传改良及大中径材培育技术研究报告. 北京：中国林业科学研究院

张少昂，王冬梅. 1992. Richards 方程的分析和一种新的树木理论生长方程. 北京林业大学学报，14(3)：99~105

Charles P W. 1932. The Gompertz curve as a growth curve. Proceedings of the National Academy of Sciences，18(1)：1~9

FAO. 1998. Terms and Definitions，Working paper 1，FRA2000. Rome

Gadow K V，Hui G Y. 1998. Modeling forest development. Goettingen：Cuvillier Erlag

Ishikawa Y. 1998. Analysis of the diameter distribution using the Richards distribution function (III). Relationship between mean diameter or diameter variance and parameter m or k of uniform and even-aged stands. J Plann，31：15~18

Kiviste A K. 1988. Mathematical functions of forest growth. Russion：Estonian Agricultural Academy

Mark O K. 1998. Site index curves for pinus nigra grown in the south island high country，New Zealand Journal of Forestry Science，28(3)：389~399

Mitscherlich E A. 1919. Problems of plant growth. Landwirtschaftliche Jahrbucher，53：167~182

Richards F J. 1959. A flexible growth function for empirical use. J Exp Bot，10(29)：290~300

Ricker W E. 1979. Growth rates and models. Fish Physiol. 8：677~743
Zeide B. 1989. Accuracy of equations describing diameter growth. Can J For Res，19：1283~1286
Zeide B. 1993. Analysis of growth equations. For Sci, 39(3)：594~616

4 Fuzzy 分布函数在杉木人工林林分直径结构上之应用研究

在现实客观世界中，既存在着许多确定性与随机性的现象，还普遍存在着模糊现象。例如，自然现象中的“大雨”、“中雨”、“小雨”，“优势木”、“亚优势木”、“中等木”、“被压木”，“大径材”、“中径材”、“小径材”等，它们不是确定性的，之间没有严格的界限，且不同于概率论所指的不确定现象，而属于模糊概念。20 世纪 60 年代中期，以 L. A. Zadek(1965)的“Fuzzy sets”论文为标志，模糊性概念迅速在数学各个分支形成，模糊分析方法在各个领域得到了广泛的应用(Marjan 2000，Alexandr 1997，Fisher 1995)。林分直径结构是最重要、最基本的林分结构。对于林分直径结构模型的研究，众多学者做出了可贵的探索，先后提出了林分表法、相对直径法、概率分布函数法、种群分布模型和理论生长方程法等模拟、预测方法(张建国等 2003，段爱国等 2003，吴承祯 1998，Gadow 1998，惠刚盈 1995，Zeide 1993，Davis et al. 1987，李凤日 1986，Bailey et al. 1973)，其中的一些方法已被证明是比较好的，但这些方法都未建立在林分直径径阶分布的模糊性内涵的基础之上。鉴于此，本文提出应用 Fuzzy 分布函数来对林分直径结构进行描述。在研究了 5 种常见 Fuzzy 分布函数的基础上，提出 1 种拓展型的 Fuzzy 分布函数，分析了其拐点的变化规律，进而从拐点的角度比较分析了包括种群动态模型 Logistic 方程及理论生长方程 Korf 和 Gompertz 在内的 9 种方程的模拟精度，并就林分年龄、立地、密度对方程模拟精度的影响做了探索，以期进一步完善林分直径结构的模拟技术，揭示导致各种模型模拟性能差异的本质，为杉木人工林定向培育提供科学可靠的依据。

4.1 材料与方法

4.1.1 试验地概况

详见 3.1 节相关内容。

4.1.2 试验设计及数据采集

材料选取的是江西省大岗山年株林场杉木密度试验林。由 2m×3m(*A*)、2m×1.5 m(*B*)、2m×1m(*C*)、1m×1.5m(*D*)、1m×1m(*E*)5 种密度组成一个区组，重复 3 次，共 15 个小区，分别记为(a_1、a_2、a_3，…，e_1、e_2、e_3)，每个小区面积为 600m^2。采用随机区组排列，并在每个小区四周各设计两行同样密度的保护带。对每株树挂牌记号做连续观测，10 年生前逐年调查，10 年生后隔年调查，前后调查 10 次，

共 150 个样本，测定每木胸径，至 1999 年止。所有林分都属于未间伐林分。基本数据的描述如表 4-1 所示。

表 4-1　模型拟合数据的基本情况

Table 4-1　Description of the data used for fitting the models

样本 (sample)	初植密度 initial planting density (株/hm²)	林分密度 (stand density) (株/hm²)	年龄(age) (a)	立地指数 (site index) (m)	胸径(DBH)/cm 平均 (mean)	胸径(DBH)/cm 范围 (range)	树高(height)/m 平均 (mean)	树高(height)/m 范围 (range)
A	1667	1633~1667	6~20	12.52~16.42	14.13	7.90~18.35	10.69	5.50~15.50
B	3333	3200~3333	6~20	14.52~16.92	11.14	6.59~14.07	9.79	5.10~15.2
C	5000	4267~5000	6~20	14.07~14.47	9.33	5.59~12.27	8.96	4.65~13.70
D	6667	5450~6667	6~20	12.88~13.25	8.14	5.16~10.89	8.11	4.60~12.60
E	10000	5783~10 000	6~20	13.85~14.23	7.84	4.97~10.75	8.19	4.40~13.20

4.1.3 Fuzzy 分布函数的确定

林分每木检尺后，林分内单株胸高直径即形成一个序列，采用 2cm 为径阶距做模糊统计，形成由多个模糊数构成的模糊数组，并统计得出每一径阶中值所对应的林木株数，进行归一化处理求出相对频率分布，进而做累加生成 [0，1] 之间并定义为小于或等于某一径阶的累积百分比分布序列，如图 4-1 所示。

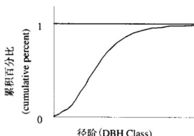


图 4-1　典型的直径累积百分比分布曲线

Fig. 4-1　The typical curve of diameter cumulative percent distribution

由于这一累积百分比分布序列呈非线性关系，因此，隶属函数形式选择 Γ 型、正态型、柯西型分布等 5 种典型的具有非线性过渡带的隶属函数；又因为分布序列呈递增趋势，所以选择上述分布形态的偏大型分布。分布的论域为实数域 R，故将隶属函数称为模糊分布。为方便描述，将 5 种分布函数依次记为 Fuzzy-Γ_1、Fuzzy-Γ_2、Fuzzy-Γ_3、Fuzzy-Γ_4 及 Fuzzy-C 分布，各分布数学表达式及基本图形如图 4-2、图 4-3 所示。

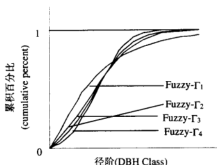


图 4-2　4 种 Fuzzy 分布之基本形状

Fig. 4-2　The basic figures of four kinds of Fuzzy distributions

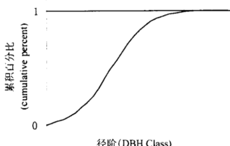


图 4-3　Fuzzy-C 分布之基本形状

Fig. 4-3　The basic figure of　Fuzzy-C

1) Fuzzy-Γ_1(Γ偏上型分布)

$$\mu(x)=\begin{cases}0 & (x\leqslant a)\\ 1-\mathrm{e}^{-k(x-a)} & (x>a)\end{cases}$$

2) Fuzzy-Γ_2(正态偏上型分布)

$$\mu(x)=\begin{cases}0 & (x\leqslant a)\\ 1-\mathrm{e}^{-k(x-a)^3} & (x>a)\end{cases}$$

3) Fuzzy-Γ_3

$$\mu(x)=\begin{cases}0 & (x\leqslant a)\\ 1-\mathrm{e}^{-k(x-a)^2} & (x>a)\end{cases}$$

4) Fuzzy-Γ_4

$$\mu(x)=\begin{cases}0 & (x\leqslant a)\\ 1-\mathrm{e}^{-k(x-a)^4} & (x>a)\end{cases}$$

5) Fuzzy-C(Cauchy 分布)

$$\mu(x)=\begin{cases}0 & (x\leqslant a)\\ 1/[1+k(x-a)^{-b}] & (x>a)\end{cases}$$

上述 5 种分布中，参数 $a>0$，$b>0$，$k>0$。

4.1.4 参数的求解方法及拟合性能的比较

由于所用分布均为非线性函数，其参数先由经验值及林分直径累积分布曲线估计初值，再采用 SAS 软件之非线性回归法进行求解，予以调整，进而求出各样本径阶株数累积百分比的理论值与实际值间的剩余标准差，用剩余标准差(SER)比较上述 5 种分布函数的拟合精度；运用图示法对推广型 Fuzzy 分布函数、种群分布模型(Logistic 方程)及理论生长方程(Korf 和 Gompertz)的拐点变化规律进行分析；分别统计出不同立地、不同密度及相同密度条件下不同年龄时样本的平均剩余标准差，运用散点图做直观的精度比较。

4.2 5 种 Fuzzy 分布函数拟合效果分析

5 种 Fuzzy 分布函数拟合的参数值范围及精度统计结果如表 4-2 所示。

表 4-2 5 种 Fuzzy 分布函数拟合的参数值范围及精度统计结果

Table 4-2 Estimated regression coefficients, determination coefficient(R^2), and SER for different Fuzzy distribution functions

方程 (equation)	参数范围(the range of parameters)			拐点 (inflection point)	拟合统计量(fit statistics)	
	k	a	b		R^2	SER
Fuzzy-Γ_1	0.0849~0.4186	1.7914~12.4408		无	0.7539~0.9713	0.1586(5)
Fuzzy-Γ_2	0.0114~0.3135	1.1409~11.6427		0.3935	0.9727~0.9999	0.0402(4)
Fuzzy-Γ_3	0.0008~0.0166	0~9.5397		0.4866	0.9877~1.0000	0.0210(1)
Fuzzy-Γ_4	0.0001~0.0025	0~7.3719		0.5276	0.9765~1.0000	0.0268(2)
Fuzzy-C	0.6276~0.8245	0~4.6800	4.5071~11.3865	0.6945~0.7280	0.9811~0.9995	0.0375(3)

从表 4-2 中可以看到，除 Fuzzy-Γ_1 外，其他 4 种分布拟合精度相对较高，决定系数 R^2 均在 0.9700 以上，说明此 4 种分布函数对林分直径累积分布具有较好的拟合性能；Fuzzy-Γ_1 模拟曲线的最大决定系数为 0.9713，其值比另外 4 种分布的最小决定系数(0.9727)还小，这说明不具拐点的 Fuzzy 分布函数比具有拐点的拟合性能要差；SER 值显示 5 种分布模拟精度从大到小依次为 Fuzzy-Γ_3、Fuzzy-Γ_4、Fuzzy-C、Fuzzy-Γ_2、Fuzzy-Γ_1，结合各分布的拐点取值情形，可以初步得出，拐点在 0.5 左右的 Fuzzy 分布对林分直径累积百分比分布具有更好的模拟性能。

Fuzzy-Γ_3 的大、小决定系数相对其他分布均较高，因此选择该分布研究参数与林分因子间的关系，并做图 4-4 予以直观描述。

从图 4-4 中可以看出，参数 k、a 分别随林分的年龄、密度的变化呈明显下降

趋势。经比较分析，参数 k 与年龄的关系可用幂函数表达为：$k=0.1584x^{-1.6503}$，其相关系数 R 为 0.9000；参数 a 与密度的关系式选用二次多项式 $a=10.3670-0.0025x+1\times10^{-7}x^2$，相关系数达 0.9152。回归方差分析结果表明，两种回归在 0.0001 检验水平上均呈显著相关，这说明参数 k 和 a 与年龄和密度的关系均十分紧密。分析表明参数 k 与密度及参数 a 与年龄的相关性均较差。

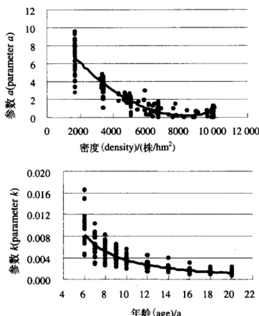


图 4-4　Fuzzy-Γ_3 分布的参数 k 及参数 a 分别随林龄和密度的变化趋势图

Fig. 4-4　Development of parameter k with age and parameter a with density in Fuzzy-Γ_3's model

对未来林分进行预测是一切模拟试验的最终目的，而预测方法往往追求既科学可靠又简洁实用。从以上的分析可以知道，应用 Fuzzy-Γ_3 分布函数，只需知道未来林分的年龄及现实林分密度，构建林分自然稀疏模型，即可对未间伐林分未来的直径分布做出有效的预测。

4.3　一种拓展型的 Fuzzy 分布函数

从表 4-2 中前 4 种分布函数可以看出，它们的数学表达式非常相似，不同的仅是自变量的幂指数，而这一指数反映了方程的拐点情形。表 4-2 充分表明，拐点不同时，4 种方程的模拟精度差异明显。鉴于此，引进一个参数后，即可得到一种拓展型的 Fuzzy 分布函数，其数学表达式如下所示，可以发现该式与 Weibull 概率密度函数的累积分布式几乎完全相同。该函数在参数 $c>1$ 的情形下具有拐点，

且其拐点具有可变性，故适应性更广，本文称其为升半的拓展分布，记为 Fuzzy-Γ_5。

$$\mu(x)=\begin{cases}0 & (x\leqslant a)\\ 1-\mathrm{e}^{-k(x-a)^c} & (x>a)\end{cases}$$

其拐点表达式为 1-exp[(1−c)/c]。

从表 4-3 可以看出，推广型 Fuzzy 分布具有较好的模拟性能。参数 c 均大于 1，Fuzzy-Γ_5 分布存在拐点，一定程度上反映了杉木人工林直径累积百分比分布为一种“S”形分布，且先下凸后上凸。

表 4-3　描述该分布模拟林分直径累积分布时的统计结果

Table 4-3　Estimated regression coefficients，coefficient of determination(R^2)，and SER for Fuzzy-Γ_5 distribution function

方程 (equation)	参数范围(the range of parameters)			拟合统计量(fit statistics)	
	k	a	c	R^2	SER
Fuzzy -Γ_5	6.0428×10^{-10}~0.0362	0~12.0000	1.9304~8.5945	0.9877~1.0000	0.0144

为深入了解 Fuzzy-Γ_5 分布的拐点变化规律，特对其拐点与林分因子如年龄、密度、立地等的关系进行了探讨。3 因子与拐点的关系可采用二次多项式予以较好的描述，拐点与林分年龄、初植密度、林分密度、立地的相关系数分别为 0.4308、0.5676、0.5023、0.3267，回归方差分析结果表明，除第 4 种外，前 3 种回归在 0.0001 检验水平上均呈显著相关性，这说明，林分年龄、密度对拐点具有较大影响作用，而立地的影响较小，又因为拐点的大小相当程度上表明林分直径分布的差异，这也说明林分直径分布受林分年龄、密度的影响较大，而立地的影响不明显。图 4-5 描述了拐点随林分年龄及密度的总体变化情况及不同初植密度时拐点随林分年龄的变化情况。

从图 4-5 中可以看到，Fuzzy-Γ_5 分布的拐点随林分年龄、初植密度的增加而减小。当初植密度一定时，拐点随林分密度的下降而呈减小趋势，当初植密度高达 10 000 株/hm^2 时，这种趋势更明显。其原因主要是在于林分发生自然稀疏后，林分密度随年龄的增大而减小，但年龄的增大致使拐点减小的缘故。这说明：拐点的大小与林分年龄、初植密度成负相关；对于不同林分而言，初植密度对直径累积分布影响较大，而对同一林分，年龄起主要影响作用。

图中 *A*、*B*、*C*、*D*、*E* 分别代表 5 种不同的初植密度，此 5 种密度林分的拐点随年龄的分布情况表明：当初植密度相同时，不论密度的高低，拐点随年龄的增加而明显下降；当林分年龄相同时，除 *A* 密度后期的个别情形表现特殊外，高密

度林分的拐点总比低密度的要小，而且，当初植密度高达 10 000 株/hm^{2}时，林分拐点较其他几种密度时明显降低，在 20 年以前，这种降低的程度随年龄逐渐增强。双因素方差分析结果表明，不同初植密度、不同年龄的林分的拐点彼此间存在显著性差异。

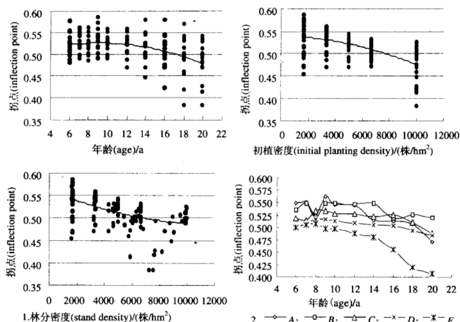


图 4-5　拐点随林分年龄和密度的总体变化趋势及不同初植密度时拐点随林分年龄的变化情况

Fig. 4-5　Development of inflection points of Fuzzy-Γ_5 model with age and density

1. 林分密度指林分现实保存密度

1. Stand density means the existing stand density;

2. *A*、*B*、*C*、*D*、*E* 分别表示 5 种不同的初植密度——1667、3333、5000、6000 和 10 000 株/hm^2

2. *A*, *B*, *C*, *D*, *E* indicate five kinds of different initial planting densities—1667, 3333, 5000, 6000 and 10 000 stems per hectare respectively

应用 Fuzzy-Γ_5 分布函数对林分直径分布进行预测时，可以采用参数回收法。先建立林分断面积平均直径与分布曲线上特殊点(直径累积百分比为 0.333、拐点及 0.9 时)所对应直径的幂函数关系，用断面积平均直径估计 3 点分别对应的直径，代入分布函数，进而求解方程组得到分布参数值。这样，只需构建林分断面积平均直径生长方程即可对未来林分直径分布做出预测。

4.4 Fuzzy 分布与理论生长方程模拟精度的比较分析

为进一步了解 Fuzzy 分布函数的模拟性能，探明导致 Fuzzy 分布函数模拟精度高低的实质原因，本文引进种群动态模型 Logistic 方程以及 Korf 和 Gompertz 2 种理论生长方程与 Fuzzy 分布函数进行比较分析。它们的数学解析式如表 4-4 所示。

当表 4-4 中各方程的参数 k 取值为 1 时，方程的值域为[0，1]，这样，方程即可应用于林分直径累积分布的模拟。表 4-5 列出了这 3 个方程与 6 种 Fuzzy 分布函数的拐点及模拟精度值。

表 4-4 Gompertz、Logistic 和 Korf 等 3 方程的数学解析性

Table 4-4 Expression，inflection point and range of parameters of Gompertz，Logistic and Korf

方程(equation)	表达式 (expression)	拐点 (inflection point)	参数范围 (range of parameters)
Gompertz	$y = k\exp(-e^{a-bx})$	$1/e$	$k, a, b>0$
Logistic	$y = k/(1+e^{p-qx})$	1/2	$k, p, q>0$
Korf	$y = k\exp(-b/x^c)$	$\exp(-1-1/c)$	$k, b, c>0$

表 4-5 6 种 Fuzzy 分布函数的拐点及模拟精度

Tab. 4-5 Range of inflection point and precision of nine different equations，including six kinds of Fuzzy distribution function

方程 (equation)	Fuzzy-Γ_1	Korf	Gompertz	Fuzzy-Γ_2	Fuzzy-Γ_3	Logistic	Fuzzy-Γ_4	Fuzzy-Γ_5	Fuzzy-C
拐点 (Inflection point)	无	0.2666~0.3292	0.3679	0.3935	0.4866	0.5000	0.5276	0.3824~0.5867	0.6945~0.7280
Precision (SER[a])	0.1586	0.0588	0.0403	0.0402	0.0210	0.0192	0.0268	0.0144	0.0375

SER 为剩余标准差的缩写，表中值是 150 个样本的平均值。

SER[a] is the abridgement of "standard error of residue"，and an average value of 150 samples.

表 4-5 表明，各方程模拟精度的高低为：Fuzzy-Γ_5 > Logistic > Fuzzy-Γ_3 > Fuzzy-Γ_4 > Fuzzy-C > Fuzzy-Γ_2 > Gompertz > Korf > Fuzzy-Γ_1。在 Fuzzy 分布函数中，除 Fuzzy-Γ_1 精度较低外，其他分布均表现较好，尤以拓展型的 Fuzzy-Γ_5 为最佳。图 4-6 直观地反映了 Fuzzy-Γ_1 外的 8 种分布模拟精度的大小。

拐点指示林分直径累积频率变化量最大的时刻。Fuzzy 分布函数等模拟模型的拐点取值情形对拟合精度会产生重要的影响。鉴于所选分布函数中，拐点固定且

其大小不一的函数较多，这里有必要对各函数的拐点性质作进一步的分析。

从表 4-5 可以看到，Fuzzy-Γ_1 分布没有拐点，Fuzzy-Γ_5、Korf 及 Gompertz 3 种分布的拐点存在一个浮动范围，而其他 5 种分布的拐点均为定值。结合各分布的模拟精度以及图 4-6 可以发现，模拟精度最高的分布为具有浮动拐点的 Fuzzy-Γ_5，其拐点范围为 0.3824~0.5867，且 98%在[0.4，0.6]这一区间内；此外，还可以看到，除 Fuzzy-Γ_5 外，从左至右，各分布的拐点逐渐增大，拐点存在于直径累积分布拐点范围之内的分布函数(Fuzzy-Γ_3、Logistic 和 Fuzzy-Γ_4)的模拟精度相对较高，且以拐点 0.5 左右为中心，模拟精度向左右两边递减。这再一次说明：不同杉木人工林林分的直径累积百分比分布的拐点存在一个主要浮动区间和一个中心分布点(这个点在 0.5 左右)；对于样本平均精度而言，分布函数的拐点存在于直径累积分布拐点的主要分布范围之内时，其模拟精度较高，而且，越接近拐点分布的中心点 0.5，其精度越高。

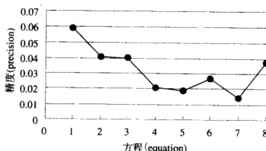


图 4-6　8 种分布方程模拟精度大小的散点图

Fig. 4-6　Modeling precision of 8 kinds of equations Figures from 1 to 8 respectively means eight kinds of different equations—Korf, Fuzzy-Γ_2, Gompertz , Fuzzy-Γ_3, Logistic, Fuzzy-Γ_4, Fuzzy-Γ_5 and Fuzzy-C

1——Korf; 2——Fuzzy-Γ_2; 3——Gompertz; 4——Fuzzy-Γ_3;

5——Logistic; 6——Fuzzy-Γ_4; 7——Fuzzy-Γ_5; 8——Fuzzy-C

4.5　林分因子对 Fuzzy 等分布函数模拟精度的影响

通过前面的研究可以知道，林分年龄和密度对林分直径累积分布的拐点具有明显影响，以及 Fuzzy 分布的拐点取值大小与模拟精度的高低存在紧密的关系，那么林分年龄、密度对 Fuzzy 等分布函数模拟精度存在什么样的直接影响，Fuzzy 等分布函数对不同状态的林分又存在什么样的适应性？这里对此问题做了较为深入的探讨。

表 4-6 反映了 5 种初植密度时不同分布函数间模拟精度的差异。从表 4-6 中可

以看出，每一分布函数在不同初植密度时的模拟精度都不相同，差异最小的是 Fuzzy-Γ_5分布，为 0.0048，差异最大的是 Fuzzy-Γ_1分布，为 0.0804，这表明初植密度对不同拐点的分布函数模拟精度的影响程度并不一样。不同初植密度时，包括 6 种 Fuzzy 分布函数在内的 9 种分布形式模拟精度大小的排序各不相同，总的来看， Fuzzy- Γ_5、Fuzzy-Γ_4、Logistic 以及 Fuzzy-Γ_3 4 种分布模拟精度比较高，因此，应用此 4 种分布就能对不同初植密度的林分直径分布进行较好的模拟。

Fuzzy-Γ_5 分布在各种密度时均表现最优，主要是因为该分布的拐点能随林分具体直径分布的变化而进行合理的变动，从而具有良好的适应性；Fuzzy-Γ_4 在 *A*、*B*、*C* 等 3 种初植密度时的精度值均排在第 2 名，而在 *D*、*E* 密度时，分别排在第 5、7 名，这是因为该分布的拐点略大于 0.5，且累积分布拐点随初植密度的增大而减小的缘故，这表明 Fuzzy-Γ_4 对相对低的密度具有较好的模拟性能；与 Fuzzy -Γ_4 分布相反，因为拐点略小于 0.5，林分拐点随着初植密度的增大而逐渐减小并接近其拐点的原因，Fuzzy-Γ_3 分布对相对高密度的林分具有更好的模拟性能；Logistic 方程的拐点固定为 0.5，接近直径累积分布拐点的中心值，所以其模拟性能比较稳定且较好。 分别与 Fuzzy-Γ_4、Fuzzy-Γ_3 分布同理，Fuzzy-C 分布相对适宜于低密度林分的模拟，而 Fuzzy-Γ_2、Gompertz 分布相对适宜于高密度林分的模拟。Korf 方程模拟精度随密度的变化规律不明显。Fuzzy-Γ_1 分布无拐点，但由于其模拟曲线呈上凸形状，林分直径累积分布拐点越小越有利于它的模拟，由于累积分布拐点随密度而降低，故该分布相对适宜于高密度林分的模拟。

表 4-6　9 种分布函数的模拟精度*统计表

Table 4-6　Modelling precision of nine kinds of different equations

初植密度 (initial planting density)**	方程(equation)								
	Fuzzy-Γ_1	Korf	Gompertz	Fuzzy-Γ_2	Fuzzy-Γ_3	Logistic	Fuzzy-Γ_4	Fuzzy-Γ_5	Fuzzy-C
A	0.1989(9)	0.0469(7)	0.0364(6)	0.0577(8)	0.0250(4)	0.0209(3)	0.0197(2)	0.0159(1)	0.0278(5)
B	0.1754(9)	0.0578(8)	0.0437(6)	0.0476(7)	0.0241(4)	0.0195(3)	0.0186(2)	0.0155(1)	0.0362(5)
C	0.1554(9)	0.0661(8)	0.0450(7)	0.0385(5)	0.0226(4)	0.0218(3)	0.0209(2)	0.0163(1)	0.0447(6)
D	0.1449(9)	0.0640(8)	0.0414(7)	0.0325(4)	0.0174(3)	0.0167(2)	0.0349(5)	0.0130(1)	0.0412(6)
E	0.1185(9)	0.0593(8)	0.0350(5)	0.0248(4)	0.0160(2)	0.0173(3)	0.0400(7)	0.0115(1)	0.0373(6)

* 精度值为 30 个样本模拟所得剩余标准差的平均值。

Precision value is an average one of SER obtained from 30 samples' modeling.

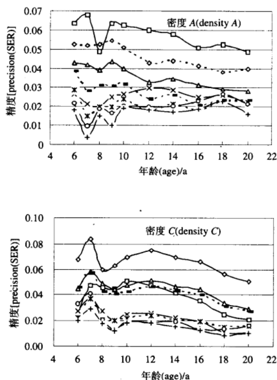
** *A*, *B*, *C*, *D*, *E* 表示 5 种不同的初植密度，分别为 1667，3333，5000，6000 和 10 000 株/hm^2。

A, *B*, *C*, *D*, *E* indicate five kinds of different initial planting densities—1667, 3333, 5000, 6000 and 10 000 trees per hectare respectively.

图 4-7 依次反映了 *A*、*C*、*E* 3 种初植密度情形下具有拐点的 8 种分布的模拟

精度随林分年龄变化情况。图 4-7 在一定程度上反映了不同初植密度时各种分布的适宜性。双因素方差分析结果表明，林分年龄对各分布模拟精度存在显著影响($F<F_{0.05}$)，概率 P 值<0.05；各分布函数间模拟精度存在极显著差异($F<F_{0.01}$)，概率 P 值<0.01。

年龄对各分布函数模拟精度影响的程度不一样。Fuzzy-Γ_5、Logistic 和 Fuzzy-Γ_3 3 种分布的模拟精度在任一林龄都较高，且随林龄的变化规律不明显，变动幅度较小，这说明这几种分布的模拟性能对林分年龄变动的适应性较好。Fuzzy-Γ_2、Gompertz、Korf 等分布的模拟精度随着林分年龄的增大而逐渐增高，且增高的幅度较大，从图 4-7 中可以看到，Fuzzy-Γ_2 分布在 E 初植密度时对 18、20 年生的林分直径累积分布模拟的精度较 Logistic 和 Fuzzy-Γ_3 分布还要高，这主要是因为它们的拐点在林分拐点分布的中心点(0.5)的左侧，随着年龄的增大，直径累积分布拐点逐渐接近此 3 种分布拐点，这也表明，Fuzzy-Γ_2 等 3 种分布相对适宜于高年龄段林分直径结构的模拟。Fuzzy-C 分布表现有点异常，该分布的模拟精度随着林分年龄的增大而呈递减趋势，表明该分布对高年龄林分模拟效果略好。Fuzzy-Γ_4 分布在高或低初植密度时，随着林分年龄的变动其模拟精度比较稳定。



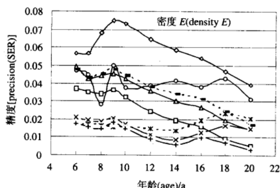


图 4-7 *A*、*C*、*E* 3 种初植密度情形下 8 种分布方程模拟精度随林分年龄的变化情况

Fig. 4-7 Development of modeling precision of 8 kinds of equations with age in the circumstances of 3 kinds of initial planting densities—*A*, *C* and *E*

◇ Korf; □ Fuzzy-Γ_2; △ Gompertz; × Fuzzy-Γ_3; * Logistic; ○ Fuzzy-Γ_4; + Fuzzy-Γ_5; – Cauchy;

Initial planting density is respectively 1667, 5000, 10000 trees per hectare from above to below.

SER is an average value of 3 samples

4.6 结论

本文根据杉木人工林林分胸高直径分布存在的模糊性，引进 Fuzzy 分布函数对其进行模拟。由于各 Fuzzy 分布形状不同，它们的模拟性能也产生了差异，本文对这种差异的大小及产生此种差异的原因进行了较为深入的探讨，得到了如下主要结论：

1) 9 种分布模拟精度表现为：Fuzzy-Γ_5 > Logistic > Fuzzy-Γ_3 > Fuzzy-Γ_4 > Fuzzy-C > Fuzzy-Γ_2 > Gompertz > Korf > Fuzzy-Γ_1，其中，拓展型 Fuzzy-Γ_5 分布的模拟性能最佳。

2) 林分直径累积百分比分布存在拐点，拐点的大小与林分年龄、初植密度成负相关。对于不同林分而言，初植密度对直径累积分布影响较大，而对同一林分，年龄起主要影响作用。

3) 林分直径累积分布拐点的主要分布范围为 0.4~0.6，且存在一个分布中心点，该点在 0.5 左右。对于样本平均精度而言，分布函数的拐点存在于直径累积分布拐点的主要分布范围之内时，其模拟精度较高，而且，越接近直径累积分布拐点的中心点，其精度越高。

4) 林分年龄、初植密度对各分布的模拟精度具有不同程度的影响。Fuzzy-Γ_5、Fuzzy-Γ_3、Logistic 等分布的模拟性能稳定且较好。不同分布函数适宜模拟不同具体林分的直径分布。

5) Fuzzy-Γ_3 分布的参数与林分年龄、密度间存在极紧密的相关关系，可采用

参数预测法对未来林分直径分布做出预测。

Fuzzy 分布函数引入林分直径分布的模拟技术中，有利于对直径分布的正确认识及其模拟技术的进一步完善。将林分因子与分布函数的形状(指分布曲线的拐点)结合起来进行研究，有利于弄清各分布模拟性能好坏的实质原因，并对具体林分选择合适的分布具有重要的指导意义。

参 考 文 献

段爱国，张建国，童书振. 2003. 6 种生长方程在杉木人工林林分直径结构上的应用. 林业科学研究，16(4)：423~429

李凤日. 1986. 林木直径分布的研究(综述). 林业译丛，4：12~18

张建国，段爱国. 2003. 理论生长方程对杉木人工林林分直径结构的模拟研究. 林业科学，39(6)

Arasan V T, Wermuth M, Srinivas B S. 1996. Modeling of stratified urban trip distribution. Journal of Transportation Engineering, 122：342~349

Bailey R L, Dell T R. 1973. Quantifying diameter distribution with the Weibull function. For Sci, 19：97~104

Davis L S, Johnson K N. 1987. Forest management. 3rd ed. New York: McGraw-Hill

Kangas A, Maltamo M. 2000. Calibrating predicted diameter distribution with additional information. For Sci, 46：390~396

Kivinen V P, Uusitalo J. 2002. Applying fuzzy logic to tree bucking control. For. Sci., 48：673~684

Li F S, Zhang L J, Davis C J. 2002. Modeling the joint distribution of tree diameters and heights by bivariate generalized beta distribution. For Sci, 48：47~58

Liu C M, Zhang L J, Davis C J. 2002. A finite mixture model for characterizing the diameter distributions of mixed-species forest stands. For Sci, 48：653~661

SAS Institute. 1991. SAS/STAT user's guide, Version 6.03. Cary, NC: SAS Institute Inc

William P, Fisher J R. 1995. Fuzzy truth and the Rasch model. Measurement Transactions. 9：442

Zadeh L A. 1965. Fuzzy sets. Information and Control, 8：338~357

Zimmermann H J. 1996. Fuzzy set theory and its applications. Boston-Dordrecht-London: Kluwer Academic Publishers

5 杉木人工林林分直径结构动态预测

林分直径结构不仅是林分树高、断面积和材积等结构的基础，而且也是估算林分材种出材量、指导抚育间伐、掌握林木枯损进程、确定合理轮伐周期，以及准确评定生产力的基础(盛炜彤 1996)。精确的林分直径结构预测能为科学地进行人工林的定向培育提供可靠的理论依据。模拟是预测的前提条件，预测是模拟的最终目的。通俗地讲，预测就是采用模拟模型对未知的林分状况进行预估。对于林分直径结构的研究，总体上可分为两个阶段即基于现实林分的静态模拟阶段和基于未知林分的动态预测阶段。先后发展利用了相对直径法、概率函数法、理论生长方程法来描述林分直径结构，其中理论生长方程因为能有效地描述种群生长动态且具有合理的理论解释基础而被证明是一种前景良好的拟合手段(Ishikawa 1998)。20世纪70年代以后，随着参数预测(PPM)、参数回收(PRM)以及概率转移矩阵等技术(尤其是前两者)的出现，直径结构的研究进入动态预测阶段。由于模拟与预测两者间相辅相成的关系，模拟技术的每一次革新都会带来预测效果的进一步提高，反之，预测的需求也会刺激模拟技术的不断创新。在做预测时，无论是概率函数，还是理论生长方程，都需要对参数进行求解，参数预测法和参数回收法便应用而生。Hyink 和 Moser(1983)提出，与其用经验函数预估分布参数，倒不如采用林分特征值来恢复参数。在对参数进行预测时，所采用的函数主要为效果较好的 Weibull 概率函数。近 20 年来，参数回收法逐渐成为主要的预测手段，出现了以概率函数和生物种群分布理论为基础的参数回收模型。纵观直径结构预测领域的研究，主要存在以下几方面的问题：①将参数预测法和参数回收法割裂开来进行研究，从模拟所采用的材料、方程，到方程参数的求解方法以及检验材料和检验方法均不一致，致使一定程度上丧失了比较此两种方法预测效果的前提；②基于不同模拟材料、不同检验材料，对不同方程之预测效果进行评定，从而得不到真实、准确的结果；③在做预测时，缺乏从林分年龄、立地、密度及间伐强度等方面寻求影响检验通过率的深层原因。

本文在克服以往研究中不足之处的基础上，对两种参数预测方法及不同理论分布函数在林分直径结构预测的研究中所表现的效果进行了比较，并就影响预测时检验通过率的原因从林分的角度进行了探讨，旨在为杉木人工林林分直径结构动态变化给出一种科学、可靠的预测方法，同时为杉木人工林的定向培育提供切实的理论和实践依据。

5.1 材料与方法

5.1.1 样地概况

试验区样地概况详见 3.1.1.1。

5.1.2 试验材料

试验材料详见 3.1.1.2 和 3.1.1.3。

5.1.3 研究方法

本文采用 Weibull(2 参数)、Richards、Logistic 等 3 种生长方程对林分直径累积分布进行模拟，采用 SAS 统计分析软件，分别将年株林场场部后山、青石湾及山下林场等三处固定样地中的一处用于建模，而将另两处作为预测材料，采用 *K-S* 检验方法分别进行检验，通过分析适合度(即通过率)来比较方程间的预测效果。当运用场部后山试验林作为 Weibull 方程的建模材料并用山下林场试验林做检验时，同时采用参数预测法和参数回收法，并对此 2 种方法预测的效果进行比较分析。做参数回收时，采用 3 种不同的幂函数形式，可称回收模型，其形式与上述各方程的表达式见表 5-1。

表 5-1 模拟模型和回收模型的数学表达式

Table 5-1 The mathematical expressions of modeling model and recovery model

模拟模型(modeling model)			回收模型(recovery model)		
Richards	Weibull	Logistic	3 变量 (three variables)	2 变量 (two variables)	单变量(最简式) (one variable)
$y=(1-be^{-kx})^{\frac{1}{1-m}}$	$y=1-\exp[-(x/b)^c]$	$y=1/(1+e^{p-qx})$	$x=ah^b n^c D^{dh^e n^f}$	$x=ah^b D^{dh^e}$	$x=aD^b$

表 5-1 中，x 为方程曲线的横坐标，即直径；y 为纵坐标，指直径分布累积百分率；a、b、c、d、e、f、m、k 为未知参数；变量 h 为林分优势高，变量 n 为林分密度，变量 D 为林分断面积直径。

采用单因素方差分析方法探讨未知林分的各项因子对预测效果的影响。

5.2 生长方程预测效果之影响因子的探讨

Richards、Weibull、Logistic 等 3 种生长方程经 3 点回收、差分还原(吴承祯 1999)或 2 点回收、差分还原(惠刚盈 1995)的途径实现林分直径结构的预测后，预测效果如表 5-2、表 5-3 所示。

表 5-2　Richards 等 3 种生长方程预测效果(相关指数)*

Table 5-2　The forecast effect (correlation index) of three kinds of growth equations including Richards

回收模型 (recovery model)	建模样地 (modeling plots)	理查德(Richards)			韦布尔(Weibull)		逻辑斯蒂(Logistic)	
		$R^2_{0.333}$	$R^2_{拐}$	$R^2_{0.9}$	$R^2_{拐}$	$R^2_{1-1/e}$	$R^2_{拐}$	$R^2_{0.9}$
$x=ah^bn^cD^{dh^en^f}$	场部后山(Back Hill)	0.9926	0.9739	0.9912	0.9939	0.9950	0.9952	0.9895
	青石湾(Qingshi Bend)	0.9869	0.9581	0.9682	0.9869	0.9873	0.9897	0.9612
	山下(Shanxia)	0.9784	0.9670	0.9859	0.9852	0.9952	0.9888	0.9860
$x=ah^bD^{dh^e}$	场部后山(Back Hill)	0.9901	0.9716	0.9912	0.9919	0.9942	0.9938	0.9903
	青石湾(Qingshi Bend)	0.9869	0.9553	0.9757	0.9865	0.9833	0.9864	0.9513
	山下(Shanxia)	0.9756	0.9672	0.9851	0.9836	0.9950	0.9877	0.9843
$x=aD^b$	场部后山(Back Hill)	0.9778	0.9649	0.9835	0.9856	0.9935	0.9865	0.9736
	青石湾(Qingshi Bend)	0.9838	0.9505	0.9747	0.9830	0.9859	0.9880	0.9577
	山下(Shanxia)	0.9688	0.9665	0.9740	0.9799	0.9945	0.9865	0.9736

* $R^2_{0.333}$、$R^2_{拐}$、$R^2_{1-1/e}$及$R^2_{0.9}$分别表示方程曲线上点 0.333、拐点、1−1/e 和 0.9 处的横坐标即直径与林分断面积平均直径的相关指数。

$R^2_{0.333}$、$R^2_{拐}$、$R^2_{1-1/e}$ and $R^2_{0.9}$ respectively express correlation index between *DBH* and average diameter of cross-sectional area—abscissas of point 0.333, inflection point, point 1−1/*e* and point 0.9 of equation curves.

影响检验通过率的原因可从模拟模型、回收模型、建模材料以及检验材料等 4 个方面进行探讨。从表 5-2 中可以看出，所得到的参数回收模型的相关指数均在 0.95 以上，而且，表 5-1 中 3 种回收模型的相关指数从左到右依次略有降低，但对表 5-3 中的检验适合度所进行的双因素方差分析结果(见表 5-4 中的①项即以场部后山材料建模而以青石湾材料作检验)表明，3 种幂函数间存在极显著差异，其中，当选用仅有断面积平均直径一个变量的幂函数(可称最简幂函数)时，除个别情形外，适合度均为最高。这说明在参数回收模型相关指数都很高的条件下，增加回收模型变量(如林分密度和优势高)的个数并不益于检验适合度的提高。另外可以看到，采用最简幂函数时，适合度全部在 50%以上，且适合度在 60%以上的比例接近 70%，达到了预测的一般要求，后面的分析均以此为基础。

在检验材料相同的条件下，对不同建模材料和不同建模方程时的适合度进行双因素方差分析，探讨不同建模材料对检验适合度的影响。结果(见表 5-4 中的②项即以青石湾和山下材料分别建模而用场部后山材料进行检验)表明，不同建模材料有时会对检验适合度具有显著影响。因为，当模拟模型一定时，建模材料直接决定着模型的参数变化，所以，在对未知林分做预测时，就有必要对建模材料进行一下选择，采用现实林分建模来对林分自身未来状况进行预测效果肯定会很好。当然，采用何种状态下的林分建模可以用来预测何种林分的直径分布是一个有待

进一步深入探讨的问题，即模拟材料与检验材料的一致性问题。

表 5-3　Richards 等 3 种生长方程预测效果(检验适合度)

Table 5-3　The forecast effect (adaptation degree for test) of three kinds of growth equations including Richards

回收模型 (recovery model)	建模样地 (modeling plots)	检验样地 (test plots)	Richards	Weibull	Logistic
$x=ah^bn^cD^{dh^en^f}$	场部后山(Back Hill)	青石湾(Qingshi Bend)	40.61%	42.42%	32.73%
		山下(Shanxia)	76.73%;	80.50%	76.10%
	青石湾(Qingshi Bend)	场部后山(Back Hill)	25.33%	34.67%	55.33%
		山下(Shanxia)	25.16%	40.25%	39.62%
	山下(Shanxia)	场部后山(Back Hill)	66.67%	61.67%	59.33%
		青石湾(Qingshi Bend)	43.64%	41.33%	39.39%
$x=ah^bD^{dh^e}$	场部后山(Back Hill)	青石湾(Qingshi Bend)	27.27%	34.55%	35.76%
		山下(Shanxia)	88.68%	91.82%	90.57%
	青石湾(Qingshi Bend)	场部后山(Back Hill)	43.33%	20.67%	34.00%
		山下(Shanxia)	75.47%	36.48%	47.17%
	山下(Shanxia)	场部后山(Back Hill)	68.67%	66.68%	68.67%
		青石湾(Qingshi Bend)	36.97%	39.67%	38.18%
$x=aD^b$	场部后山(Back Hill)	青石湾(Qingshi Bend)	64.24%	57.58%	63.64%
		山下(Shanxia)	79.87%	83.02%	81.13%
	青石湾(Qingshi Bend)	场部后山(Back Hill)	61.33%	50.67%	58.00%
		山下(Shanxia)	79.25%	72.96%	82.39%
	山下(Shanxia)	场部后山(Back Hill)	76.00%	72.67%	78.00%
		青石湾(Qingshi Bend)	52.12%	55.39%	53.94%

选取最简幂函数进行参数回收时，当建模试验地一定的条件下，对不同建模方程和不同检验材料时的适合度作双因素方差分析，结果表明(见表 5-4 中的③项即以青石湾建模而用山下和场部后山材料分别检验和④项即以场部后山建模而用青石湾和山下材料检验)，Richards 等 3 种建模方程对适合度的差异无显著影响，而不同的检验材料则呈显著影响或极显著影响。这里需要指出的是，当建模材料与检验材料都不相同的情况下，适合度的大小是没有可比性的，因而也不能说明不同方程间预测性能的好坏，但以往的研究中往往出现这样不适的比较。不难理

解，由于 Richards、Weibull、Logistic 等 3 种生长方程均能较好地对林分直径结构进行模拟，因此，它们的预测性能也比较接近。从表 5-3 中可知，Richards 方程预测效果要略好，其 6 种情形下的适合度仅有 1 种低于 60%。

表 5-4　检验适合度的方差分析结果

Table 5-4　Variance analysis result of test adaptation degree

数据基础(data basis)	分析对象(analysis objection)	自由度 DF	均方 MS	*F* 值	概率 *P*>*F*
①	回收模型(recovery model)	2	0.0717	23.69	0.0061
	生长方程(growth equations)	2	6.49×10^{-5}	0.0214	0.9789
	误差(error)	4	0.0030		
②	建模材料(modeling material)	1	0.0535	74.4396	0.0132
	生长方程(growth equations)	2	0.0030	4.1496	0.1942
	误差(error)	2	0.0007		
③	检验材料(test material)	1	0.0695	127.3157	0.0078
	生长方程(growth equations)	2	0.0047	8.6771	0.1033
	误差(error)	2	0.0005		
④	检验材料(test material)	1	0.0572	42.1188	0.0229
	生长方程(growth equations)	2	0.0003	0.1857	0.8434
	误差(error)	2	0.0014		

5.3　参数预测法和参数回收法预测效果的比较研究

Weibull 生长方程是公认的对林分直径分布模拟效果较好的数学函数，常采用最大似然估计法、百分位数法、线性求解法及近似估计法等方法对参数进行求解，因为该方程参数的生物学意义明显，故作预测时主要采用参数预测法，但由于在以前的研究中，Weibull 方程习惯上被看做概率密度函数，模拟时方程参数的求解方法受到局限，一定程度上影响了方程的模拟和预测精度。本文采用 SAS 软件之非线性回归法对方程参数进行精确求解，并在此基础上同时采用参数预测法和参数回收法对未知林分直径分布进行预测。应用参数预测法时，分两种情形进行考虑：① 建立参数与林分胸径特征因子(偏度、峰度、标准差)和林分特征因子(平均胸径、断面积平均胸径、平均高、优势高、年龄、密度、立地指数)等 10 因子的回归关系；②建立参数与断面积平均胸径、优势高、年龄、密度、立地指数等 5

因子的回归关系。经逐步回归分析，分别得到 2 参数 Weibull 分布函数的参数预测模型，如表 5-5 所示。

表 5-5 参数预测模型及其预测效果*

Table 5-5 Parametric prediction models and their prediction effects

因子(factor)	参数预测模型 (parametric prediction model)	相关指数 (correlation index)	适合度 (adaptation degree)
10 因子 (10 factors)	$b=-1.191913-0.033264x_1+0.385885x_3+0.65326x_4+0.328759x_5-0.300405x_8$	$R^2=0.9969$	98.74%
	$c=4.641063-0.000047x_2+0.584153x_4-1.860773x_5-0.230041x_6+0.125311x_7-0.431474x_8-0.058567x_{10}$	$R^2=0.9688$	
5 因子 (5 factors)	$b=-0.627651-0.061366x_1-0.000024x_2+1.017563x_4+0.077465x_7$	$R^2=0.9955$	92.45%
	$c=4.052844-0.172612x_1+0.646232x_4-0.209797x_7-0.139446x_{10}$	$R^2=0.9149$	
单因子· (one factor)	$b=0.011182+0.816219x_4+0.017712x_4^2-0.000459x_4^3$	$R^2=0.9936$	79.25%
	$c=4.62987-0.457443x_4+0.050515x_4^2-0.00094x_4^2$	$R^2=0.5352$	

* x_1~x_{10} 分别代表年龄、密度、算术平均直径、平方平均直径、标准差、平均高、优势高、偏度、峰度和立地指数。

x_1~x_{10} respectively express age, density, arithmetical average diameter, square average diameter, standard error, average height, dominant height, skewness, kurtosis and site index.

从表 5-3 中可知，采用场部后山试验林作建模材料及山下试验林作检验材料时，2 参数 Weibull 生长方程参数回收法的预测适合度为 83.02%。结合表 5-5 可以看到：当参数预测法和参数回收法应用于预测时，两者的检验适合度均较高；10 因子的参数预测法、5 因子的参数预测法、参数回收法及 1 因子的参数预测法的检验适合度依次降低，即多因子参数预测法的适合度一定程度上高于参数回收法，而当两者均采用一个因子时，参数回收法的适合度又略高于参数预测法。这一结果表明，Weibull 方程在其参数经精确求解后，所建立的参数预测模型的检验适合度是令人满意的。自从参数回收法成为研究热点和预测的主要手段以来，参数预测法似乎不再是理想的预测方法，但随着对方程的重新认识以及模拟工具的改进，此种方法再次证明了参数预测法存在的价值，本文实证研究结果也说明了这一点。10 因子的参数预测法较 5 因子及单因子的预测效果要好一点，主要是因为作参数预测时所采用的林分因子多，参数预测模型相关指数要大，尤其是方程的形状参数 c 预测模型的相关指数明显为大的缘故。考虑到 10 因子中某些因子对于未知林分来说不易掌握，这里选用对林分生长比较关键而又常用的 5 因子(甚或单因子)建立参数预测模型，预测效果较好，供以后做参数预测时予以参考。必须注意到，在采用参数回收法进行预测研究时，回收模型中林分因子的增多并没有使检验适合度全面提高，反而在绝大多数情形下降低了适合度，这与参数预测法的检验结果刚好相反。参数回收法预测的过程中，建立的回收模型首先是对方程曲线上关

键点的横坐标(林分断面积平均胸径)进行预估，继而对多元非线性方程组进行最优化求解，并得出参数值；而采用参数预测法时，根据参数预测模型就可直接得到方程的参数值。这也许就是导致两种预测方法出现上述差异的原因所在。但是，不能选择一种方法而废弃另一种方法，因为它们各自具有其显著的优缺点：参数预测法预测过程简单，较易为人们所接受和掌握，其预测效果较好，但该方法在多因子状态时所需的已知林分因子太多，增加了对现实林分经营现状和历史的依赖；参数回收法求解过程虽相对繁琐，但其也具有良好的预测效果，由于最简回收模型只含有一个林分因子，建立了林分直径生长方程就可实现林分直径结构的动态预测，因而具有较好的开发前景。

5.4 林分因子对预测效果的影响研究

为探讨在建模材料一致的条件下各林分因子对预测适合度影响的程度，选取初植密度、年龄、立地指数、间伐等 4 林分因子作为研究对象，将表 5-3 中最简幂函数一栏以 3 种建模材料为对象分别统计林分因子各种状况下的检验适合度，结果见表 5-6。

表 5-6 林分因子对预测适合度的影响程度

Table 5-6 Influence of stand factors on prediction adaptation degree

建模材料 (modeling material)	初植密度(株/hm^2) [initial planting density(tree/hectare)]					间伐强度(thinning intensity)	
	≤2000	3000~4000	4000~6000	6000~7000	≥9000	未间伐 (unthinning)	间伐 (thinning)
青石湾 (QingshiBend)	0.7000	0.7667	0.7358	0.6667	0.4333	0.6493	0.8333
山下(Shanxia)	0.7937	0.7460	0.7302	0.5079	0.3968	0.6776	0.4783
场部后山 (Back Hill)	0.9394	0.7778	0.7716	0.5152	0.3333	0.6346	0.7939

建模材料 (modeling material)	年龄(age)/a				立地指数(site index)/m			
	≤10	11~15	16~20	≥20	12	14	16	18
青石湾 (Qingshi Bend)	0.5143	0.8974	0.7849	0.6061	0.6000	0.6857	0.6667	0.9667
山下(Shanxia)	0.6733	0.6000	0.6000		0.6667	0.6011	0.6737	
场部后山 (Back Hill)	0.6476	0.7849	0.8280	0.4545	0.5455	0.7168	0.7071	0.9000

从表 5-6 可以直观看出，年龄、立地指数、间伐等各自不同情形下的适合度虽彼此间普遍存在较大差异，但总体上并不具有一定的规律性，而林分不同初植

密度间的适合度则具有一定规律性，表现为密度高的检验适合度大于密度低的检验适合度，且当密度高达每公顷 9000 株时，适合度已经低于 50%，已达不到预测的一般要求。双因素方差分析结果表明，在$\alpha=0.05$ 的显著水平下做 F 检验，年龄、立地指数、间伐等对预测适合度无显著影响，而林分的初植密度对预测适合度则存在极显著影响。

表 5-7　山下材料建模时检验适合度的分类统计结果

Table 5-7　Classified statistical result of adaptation degree of test while use materials of Shanxia tree farm to model

初植密度(株/hm^2) [initial planting density(tree/hectare)]		≤2000	3000~4000	4000~6000	6000~7000	≥9000
年龄(age)/a	≤10	70.00%	66.67%	76.67%	70.00%	53.33%
	11~15	73.33%	80.00%	73.33%	33.33%	40.00%
	16~20	100.00%	83.33%	66.67%	33.33%	16.67%
立地指数(site index)/m	12	80.00%			66.67%	54.55%
	14	81.82%	65.63%	73.02%	45.16%	43.90%
	16	78.57%	83.87%		36.36%	9.09%

表 5-8　山下材料建模时检验适合度的方差分析结果

Table 5-8　Analytic result of variance of adaptation degree of test while using materials of Shanxia tree farm to model

	分析对象(analytic objection)	自由度 DF	均方 MS	F 值	概率 $P>F$
I*	年龄(age)	2	0.0090	0.3329	0.7263
	初植密度(initial planting density)	4	0.1197	4.4457	0.0348
	误差(error)	8	0.0269		
II**	立地指数(site index)	2	0.0504	3.2857	0.1432
	初植密度(initial planting density)	2	0.1545	10.0684	0.0275
	误差(error)	4	0.0153		

*I 表示不同年龄、不同初植密度时适合度的方差分析结果。

I expresses analytic result of variance of adaptation degree in the circumstances of drifferent ages and different initial planting densities.

**II 表示不同立地指数、不同初植密度时的方差分析结果。

II expresses analytic result of variance in the circumstances of different site indices and different initial planting densities.

当采用山下林场材料建模及年株林场场部后山材料检验时，检验适合度的 2

维分类统计情况及双因素方差分析结果分别见表 5-7、表 5-8。从表 5-7、表 5-8 中得出了与表 5-6 相同的结果：密度不同于年龄、立地指数和间伐等因子，其不同情形下的适合度总体上存在一定的规律性；仅密度这一因子对检验适合度具有显著影响。

该实验结果从一个侧面说明了林分的初植密度对林分直径结构影响的程度。做预测时，必须考虑密度的这种作用，可以选取一个合适的界限将林分初植密度按大小进行分类，而后分别进行模拟和预测，这样就考虑了密度的这种突出影响，预测的适合度可能会有一定的提高，同时也有利于指导林分的经营和生产。

5.5 结论与讨论

在林学领域，模拟及预测模型的提出与研制的最终目的是对林分的生长与结构进行模仿，探寻一般发展规律，并对林分的未来状况做出准确的预测。本文正是基于这一思想，选用对林分直径结构模拟效果较好的 Richards 等 3 个方程从影响预测效果的多方面因素入手进行了探讨，实验得出如下主要结论：

不同的回收模型、不同的建模材料、不同的检验材料、Richards 等 3 方程对检验适合度的影响程度分别为：具有极显著影响、有时具有显著影响、呈显著影响或极显著影响、无显著影响。当回收模型采用最简幂函数时，适合度均在 50%以上，Richards 生长方程预测效果较好，其 6 种情形下的适合度仅有 1 种低于 60%。参数预测法和参数回收法用于预测时检验适合度均较高，此 2 种方法各有优劣，均具有很好的应用前景。林分初植密度不同于年龄、立地指数、间伐等因子，其不同情形下的预测适合度大小总体上存在一定的规律，且对适合度具有显著影响，做分类预测时，应考虑密度的这种突出效应。

对于林分直径结构模拟与预测的研究工作已开展多年，但诸多的研究都聚焦于预测适合度的高低这么一个表面指标之上，而未能就影响预测的各方面因素做深入探究，也就不能形成一个科学、实际的预测系统。本文在所掌握的材料的基础上做了有限的研究，结果表明，不同情形下的检验适合度存在巨大差别，单选用一个好的方程和一种较好的参数估计方法并不能保证检验适合度在任何情形下均高。这就说明，试图采用一种最优的预测模型来对各种状态下的林分直径结构实现准确的预测是不太可能的，因为各个林分具体所处的立地、栽植密度以及经营措施(如间伐等)各不相同，其中一些影响林分直径结构的因子会使预测效果发生改变。对于杉木这一树种而言，影响其直径结构的主要因子无非是栽植密度、年龄以及间伐体制，在实验结果的基础上，本文提出按密度做初步划分后分类建模进行预测的思想。当然，从理论上进行分析，单纯考虑密度因子还是不够的，立地、年龄及间伐作业等因子对预测也是具有很大影响的，但密度无疑是一个非常重要的因子。如何对林分直径结构进行有效的预测，本文也只是做了初步的探索，

有待进一步的改进和完善。

参 考 文 献

惠刚盈，盛炜彤. 1995. 林分直径结构模型的研究. 林业科学研究，8(2)：127~131

盛炜彤. 1996. 杉木建筑材优化栽培模式研究总报告. 见：杉木建筑材优化栽培模式研究专题. 世界林业研究，9(专集)：32~53

吴承祯，洪伟. 1999. 林分直径结构新模型研究. 西南林学院学报，19(2)：90~95

Bailey R L，Dell T R. 1973. Quantifying diameter distribution with the Weibull function. For Sci, 19：97~104

Hyink D M，Moser J W. 1983. A generalized framework for projecting forestry yield and stand structure using diameter distributions. Forest Sci，29(1)：85~95

Ishikawa. 1998. Analysis of the diameter distribution using the RICHARDS distribution function (iii). Jpn J Plann，31：15~18

Richards F J. 1969. The quantitative analysis of growth. 3~76 *In*: Steward F. C. Plant Physiology. Vol. VA. New York: Academic Press，435

Verhulst P F. 1838. A note on population growth. Correspondence Mathematique et Physiques，10：113~121

6 杉木人工林林分直径结构动态变化规律及其密度效应的研究

随着林分的生长发育，林木遗传性、微环境以及密度、间伐等人为经营措施将影响到立木的竞争能力及林分整体竞争剧烈程度，从而形成林分直径结构动态变化进程。林分直径结构动态变化的规律，可作为制定和检查营林技术措施效果的依据之一。在森林培育的整个过程中，林分密度是林业工作者所能控制的主要因素，也是形成一定林分水平结构的基础，密度是否合适直接影响到人工林生产力的提高和功能的最大发挥。国内外学者曾对人工林密度的效应进行了多方面的研究报道。密度效应可概括为初植密度及经营过程中密度调控 2 方面的作用，就初植密度对林分直径结构动态变化的影响，国外学者展开过相关的研究，但相对林分直径结构变化规律在整个林分结构动态变化规律中所占的重要地位，这些研究工作还远远不够。与全林分生长指标(如平均胸径、平均树高、平均断面积等)不同，林分直径结构动态规律的描述不能由临时样地内少量的解析木资料得到，而需固定样地的长期观测数据，这也是限制此领域研究工作深入的主要原因。杉木是我国最重要的用材林树种之一，对杉木人工林林分直径结构动态变化规律进行研究具有十分重要的理论和实践意义，有利于为杉木人工林的定向培育提供科学的理论依据。

6.1 材料与方法

6.1.1 试验地概况

试验材料见 3.1 节的相关内容。

6.1.2 试验设计及数据采集

试验设计和数据采集详见 3.1.1.2 和 3.1.1.3。

6.1.3 研究方法

将各林分胸高直径的调查数据采用2径阶划分法分别统计各径级的分布株数，建立各林分直径株数分布和累积频率分布数据库。采用描述林分直径分布曲线的形状统计量偏度(skewness, SK)、峰度(kurtosis, KT)及不均质性指标——变动系数(coefficient of variance, CV)进行研究。首先根据各样地林分直径测值求算出林分各年龄时期的偏度、峰度及直径变动系数，然后就上述各项指标分别做出动态趋势曲线，并结合林分直径株数分布直观图及 Richards 生长方程所描述的林分直径累

积分布曲线，探索林分直径结构动态变化规律及密度对其的影响。偏度、峰度及变动系数指标采用的数学表达式如下

$$SK = \frac{n}{(n-1)(n-2)}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{X_i-\overline{X}}{S}\right)^3$$

$$KT = \left\{\frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{X_i-\overline{X}}{S}\right)^4\right\} - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)}$$

$$CV = \sqrt{\frac{D_g^{\ 2}-\overline{X}^2}{X^2}}$$

以上表达式中，n 为林分株数，X_i 为林分每木直径，$\overline{X}$ 指林分算术平均直径，S 为标准差，D_g 为林分断面积平均直径。

6.2　林分直径结构偏度变化及密度对其的影响

图 6-1、图 6-2 描述了偏度随林分年龄的变化规律。从图 6-1 中可以看到偏度在本文研究的年龄范围内总体上是随林分年龄的增加而变大，早期偏度值为负值，并由负值逐渐趋向于正值，即先右偏后左偏；而且前期右偏程度逐渐变小，后期左偏程度逐渐变大，偏度绝对值先变小后变大，即林分直径分布的非对称性是先减弱后增强。

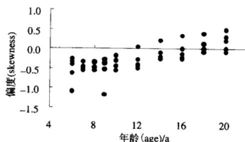


图 6-1　偏度随时间变化的关系

Fig. 6-1　The relation of skewness varying with time

图 6-2 中各种密度林分偏度的变化趋势均表现出图 6-1 所示的总体规律。从图 6-2 中可以看到自低密度 100 株/600m² 经 200 株/600m²、300 株/600m²、400 株/600m² 到高密度 600 株/600m²，林分直径分布偏度值依次增大，为消除偶然误差及其他因素的影响，考察 100、300 和 600 株时的情形(其中 300 株和 600 株时为相同的

立地指数级)，可以发现在任何时期，林分株数密度高的林分其偏度值也大，从曲线上来看表现为高密度林分曲线始终在低密度林分曲线之上。换而言之，林分株数密度越高的林分偏度值由负向正变化的时间越早。从图 6-2 中可清楚地看到某些年龄时段，密度已影响到偏度的左右偏状况，当低密度为右偏时，高密度已为左偏。从图 6-2 中还可以看到，株数密度为每 600m² 100 株的低密度林分，生长至指数年龄时其偏度值才抵达 0 点左右(即正态分布时偏度的性状)，此前一直处于右偏状态。

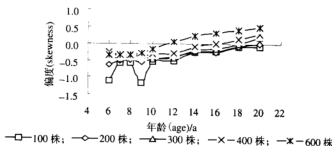


图 6-2 不同初植密度时偏度随林分年龄变化的关系

Fig. 6-2 The relationship of skewness varying with stand age in the circumstances of different initial planting densities

人工林林分的生长过程大致可分为自由生长期、竞争期和自然稀疏期等 3 个时期。从本文研究结果来看，如不考虑个体大小、遗传及微环境差异，在林分郁闭前的自由生长时期，杉木人工林林分直径分布曲线均呈右偏情形，一定时期内，右偏程度会加大，实际林分直径分布甚至出现了截右分布状况，而且低密度林分较高密度林分右偏趋势更明显，也就导致前期高密度林分偏度值要大于低密度林分偏度值，并为后来一定时期一直表现为此奠定基础。随着林分的发展，强烈的竞争最终将导致大量林木的自然稀疏，高密度的林分促进了林分竞争，也使自然稀疏发生时间更早到来。自然稀疏一旦发生，首先淘汰的是严重被压的林木。人工林内主要为小径阶的林木，于是，林分算术平均直径会显著提高，而直径分布最高峰所对应之径阶值还会保持不变或移动较小，这样就必然导致林分直径分布曲线向左偏。林分发展至自然稀疏后期，自然稀疏的这种效应减弱，会使左偏程度相应减弱，又由于林分直径生长较为缓慢，致使林分径阶间株数的转移趋于平衡，从而使林分偏度值接近 0，呈现正态分布状态。这与 Westoby 等人的研究结果大致相同。但有一点不同，即偏度最大值出现的时间不一样。Westoby 等指出偏度最大值出现在刚刚开始稀疏的林分，而据本试验研究结果表明，林分发生自然稀疏存在一个过程，在这一过程的前期，偏度值是逐渐增大，当然林木株数不可能无限制地减少，在林分经过一定程度的自然稀疏后，林分密度最终会保持在一个较稳定的范围之内，这样至少是在自然稀疏阶段的某个时期偏度值达到最大，

而不是发生在刚刚开始稀疏时。

偏度的这种动态变化规律对指导不同密度杉木人工林的间伐作业具有重要的理论和实践意义。不同初植密度林分的偏度变化规律不一样，因此，其适宜间伐的时间亦存在很大差别。从右偏转向左偏的时间越早，适宜的间伐年龄就越靠前，而当这种转变的趋势明显加强时，说明林分已处于激烈的竞争时期，宜开始进行间伐。结合图 6-2 可知，随着初植密度的增大，林分间伐的年龄应更小，600 株的林分(14 指数级)宜在 8 年生左右时进行间伐，而 100 株的林分在达指数年龄时亦可不予间伐。

6.3 林分直径结构峰度变化及密度对其的影响

图 6-3、图 6-4 描述了不同密度时林分直径分布曲线峰度随林分年龄变化的规律。

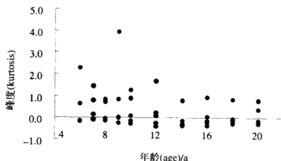


图 6-3 峰度随时间变化的关系

Fig. 6-3 The relation of kurtosis varying with time

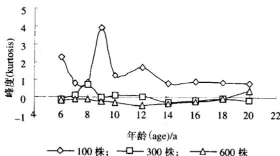


图 6-4 不同初植密度时峰度随林分年龄变化的关系

Fig. 6-4 The relation of kurtosis varying with stand age in the circumstances of different initial planting densities

从图 6-3 中可以看出，总体上，峰度随时间的增长呈下降趋势，但这种变化规律并不明显。同一年龄时期，各林分峰度值分散在时间轴两侧，其值有正有负，

说明林分尖峭平坦程度不一。

图 6-4 描述了不同初植密度时林分峰度的动态变化规律。总体上看，研究年龄范围内低密度林分的峰度值要大于高密度林分的峰度值，而且不论低密度还是高密度峰度值都趋向于0。每 $600m^2$ 100株的低密度林分其峰度值始终表现为正值，表示林分直径分布曲线尖峭。每 $600m^2$ 300 株的中密度林分及每 $600m^2$ 600 株的高密度林分峰度值均比较接近 0，且各自在一定年龄即发生大量自然稀疏以后有增大趋势。峰度直观地反映了林分直径在某一径阶范围内株数分布的集中程度，对实现预先的培育目标具有重要的指导意义。低密度林分峰度值大，表明低密度林分能更有效地实现单一材种的培育目标。研究林分峰度时，发现并非所有的林分直径均为单峰山状分布，也出现了双峰的现象。图 6-5 描述的是 3 区组 a_3 小区直径株数分布的动态变化状况，从中可以直观地看到林分株数的双峰分布状态，并且这种双峰分布还会随着林分年龄的增加而在一定年龄阶段内得以延续。描述林分分布峰度时，一般是以其最高峰为研究对象。

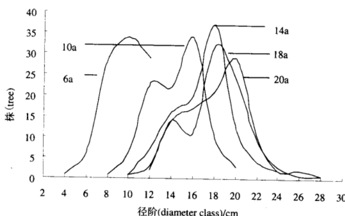


图 6-5 径阶株数频率分布的动态变化

Fig. 6-5 The dynamic variance of frequency distribution of diameter DBH-class trees

6.4 林分直径变动系数变化及密度对其的影响

图 6-6、图 6-7 描述了直径变动系数随时间的变化趋势。

从图 6-7 中可以看到，直径变动系数随着林分年龄的增长总体上呈微弱增加趋势，而且前期逐渐减小，后期缓慢增大。

究其原因，可做如下解释：CV 定义为胸高直径标准差与平均胸高直径的比值，表示一种相对变动程度。早期由于林分平均直径增长较快，而林分直径标准差虽然也增加，但增长幅度赶不上平均直径的增长，故 CV 值逐渐减小。随着林分年

龄的增长，林分竞争加剧，分化日趋严重，将导致标准差继续增加而林分直径的生长受到一定程度的抑制，这样就会使 CV 值减小的幅度逐渐变小。当林分发展到自然稀疏阶段时，激烈的自然稀疏会使林分内小径阶林木枯死而遭淘汰，标准差减小，而平均直径变大，这样 CV 值降低。在第一次激烈的稀疏后，林分 CV 值主要受两种因素的影响，一为平均直径的增大导致 CV 减小，另一就是大径阶林木迅速向前推移致使直径标准差变大，从而导致 CV 值增大，此点从林分左偏程度增大可得到佐证，最后两种效应作用的结果导致 CV 值呈增大趋势。密度越高，剧烈的自然稀疏出现得愈早，自然就可能导致其直径变动系数较低密度的小，并且较早地呈增大趋势。直径变动系数反映了林分直径分布的离散程度，与偏度相同，该指标的研究结果表明，低密度的直径变动系数更小，有利于某一材种的定向培育，而高密度林分更能满足多规格材种的需要。

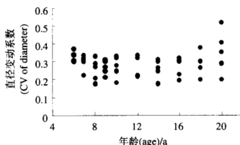


图 6-6 直径变动系数随时间变化的关系

Fig. 6-6 The relation of CV of diameter varying with time

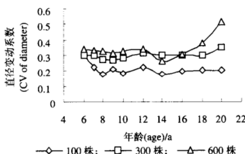


图 6-7 不同初植密度时林分直径变动系数随年龄变化的关系

Fig. 6-7 The relation of CV of stand diameter varying with age in the circumstances of different initial planting densities

6.5 林分直径株数分布和累积分布的变化情况及密度对其的影响

前面从林分直径分布的三个特征值(偏度、峰度和变动系数)出发，探讨了密度对林分直径分布的动态变化规律的影响，为更直观地反映这种规律，下面从林分直径株数分布及累积分布曲线这两个综合性指标进行进一步的分析说明。

图 6-8、图 6-9 分别描述了典型的相同密度与不同密度时林分直径累积分布曲线的状况。

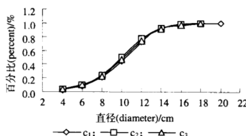


图 6-8　相同密度林分 16 年生时的累积直径分布

Fig. 6-8　The cumulative diameter distribution of stands(16a)with the same density

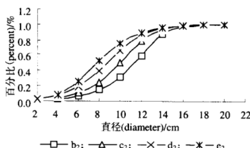


图 6-9　不同密度林分 16 年生时的累积直径分布

Fig. 6-9　The cumulative diameter distribution of stands(16a) with different densities

图 6-8 为初植密度 300 株/600m^2 的 3 个小区 16 年生林分直径累计分布，表明相同立地、相同密度的林分直径分布十分一致。图 6-9 中 4 个样本立地指数级均为 14，从左至右密度依次增加，分别为 200、300、400、600 株/600m^2。从图 6-9 中可以看到，任一相同株数累积分布时刻，高密度林分的累积百分比所对应的直径较低密度小，这说明，对于一个相同的株数百分比范围，密度越高的林分所对应直径区域中值越小，即林分整体直径构成小，这必将导致材种规格降低。

图 6-10、图 6-11 分别描述了低密度(200 株/600m^2)和高密度(600 株/600m^2)林分典型的直径结构动态变化进程。

图 6-10、图 6-11 分别为 b_1 小区和 e_3 小区 6~20 年生的直径分布隔年动态变化进程，从中可以直观地看到林分直径分布指标偏度、峰度及直径变动系数的变动情况，同时反映出三者动态变化规律的统一性。图 6-10 中偏度始终表现为右偏，但右偏程度逐渐降低。图 6-11 中偏度值表现为从右偏逐渐过渡至左偏，这些与前面的分析完全吻合。

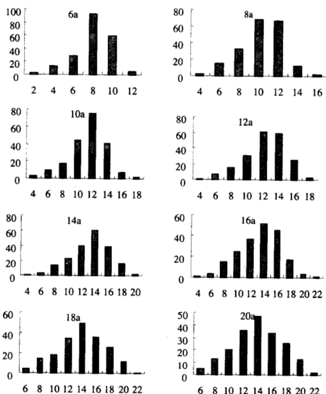


图 6-10 低密度林分株数随径阶分布的动态变化进程

Fig. 6-10 The dynamics of low-density stand with distribution of diameter class

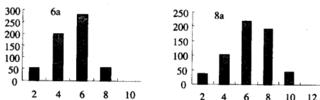


图 6-11 高密度林分株数随径阶分布的动态变化进程

Fig. 6-11 The dynamics of high-density stand with distribution of diameter class

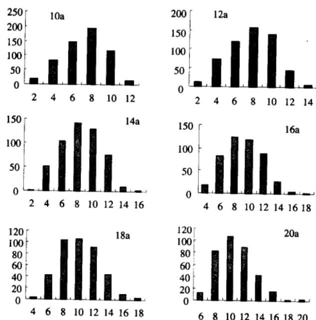


图 6-11 高密度林分株数随径阶分布的动态变化进程(续)

Fig. 6-11 The dynamics of high-density stand with distribution of diameter class(continued)

6.6 结论

本文研究的年龄范围内总体上偏度是随林分年龄的增加而变大，早期偏度为负值，并由负值逐渐趋向于正值，即先右偏后左偏；前期右偏程度变小，后期左偏程度逐渐变大，偏度绝对值先变小后变大，即林分直径分布的非对称性是先减弱后增强；峰度随时间的变化规律不明显，林分尖峭平坦程度不一，低密度林分较高密度林分而言，其峰度值要大；直径变动系数随着林分年龄的增长总体上呈微弱增加的趋势，而且前期逐渐减小，后期(郁闭以后)为缓慢增大。林分直径株数频率分布证实了上述结论。

任何时期，林分株数密度高的林分其偏度值也大，换而言之，林分株数密度越高，林分偏度值由负向正变化的时间越早。本文研究年龄范围内低密度林分的峰度值要大于高密度林分的峰度值；高密度林分的不均质性较低密度林分为大，且高密度林分的直径变动系数较低密度林分更早地开始呈增大趋势。直径结构的这种动态变化规律对指导不同密度杉木人工林的间伐及定向培育的实施具有重要的理论和实践意义。随着初植密度的增大，林分间伐的年龄应更小，600 株的林分(14 指数级)宜在 8 年生左右时进行间伐，而 100 株的林分在达指数年龄时亦可不予间伐。低密度的林分有利于某一材种的定向培育，而高密度林分更能满足多规

格材种的需要。

在任一相同株数累积分布范围，密度越小，林分的累积百分比所对应的径阶中值越大，且偏度值越小，即株数更多地分布在径阶较大的范围内，有利于中大径材的形成。

参 考 文 献

孟宪宇. 1988. 使用 Weibull 函数对树高分布和直径分布的研究. 北京林学院学报，10(1)：40~48

沈国舫. 2001. 森林培育学. 北京：中国林业出版社

童书振，盛炜彤，张建国. 2002. 杉木林分密度效应研究. 林业科学研究，15(1)：66~75

童书振，张建国，罗红艳等. 2000. 杉木林密度间伐试验. 林业科学，36(专刊 1)：86~89

吴中伦. 1984. 杉木. 北京：中国林业出版社

张建国，童书振，盛炜彤. 2000. 杉木大中径材成材机理研究(Ⅱ). 见：张建国. “九五”国家攻关专题杉木建筑材树种遗传改良及大中径材培育技术研究报告. 北京：中国林业科学研究院

Abare. 1999. Global outlook for plantation[M]，Abare Research Report Common-wealth of Australia

FAO. 1998. Terms and Definitions，Working paper 1. FRA2000. Rome

Gates D J，McMurtrie R，Borough C J. 1983. Skew reversal of distribution of stem diameter in plantations of pinus radiata. Aust For Res，13：267~270

Takashi K. 2001. DBH distribution dynamics of even-aged tree populations. Jpn J For Plann，35：31~45

Westoby M, Howell J. 1986. Self-thinning：the effect of shading on glasshouse populations of silver beet(beta vulgaris). J Ecol, 69：359~365

附录Ⅰ 树高生长方程参数值及其统计结果

表 I-1 产区层次时各生长方程模拟参数值及其统计结果

方程 (equations)	样本数 (number of samples)	参数(parameters)			RSS	R^2
		a	b	c		
Korf	272	38.7003	7.5231	0.7431	3251.4260	0.7584
Richards	272	25.9004	0.0706	1.4557	3250.8080	0.7585
Weibull	272	25.3907	0.0264	1.2549	3257.7090	0.7580
Schumacher	272	31.1111	11.5025	—	3300.7400	0.7554
Logistic	272	23.4847	1.9721	0.1516	3362.6080	0.7504
K_c	272	48.9420	—	0.5916	114.0247	0.9879
R_{c_1}	272	28.3463	—	1.3784	124.3379	0.9867
W_{c_1}	272	30.6000	—	1.2620	156.9861	0.9865
Sch_c	272	28.8967	—	—	206.3156	0.9846
L_c	272	25.7048	—	0.1273	468.5967	0.9525
R_{c_4}	272	33.2889	0.0302	0.8560	281.6568	0.9700
W_{c_2}	272	165.1728	9.7603	0.0056	178.5193	0.98240
R_{c_2}	272	30.8937	0.0437	—	208.2557	0.9780
R_{c_3}	272	—	0.0860	1.5508	108.9995	0.9887
S_c	272	1382.5030	0.6097	1.5165	92.5651	0.9903

表 I-2 地区层次时各生长方程模拟参数值及其统计结果

方程 (equations)	地区 (district)	样本数 (number of samples)	参数(parameters)			RSS	R^2
			a	b	c		
Korf	福建(Fujian)	57	35.1230	7.2547	0.7666	1236.9180	0.6256
Korf	贵州(Guizhou)	62	29.7826	8.7804	0.9149	767.2200	0.7182
Korf	湖南(Hunan)	91	44.9120	8.2300	0.7131	659.3251	0.8496
Korf	广西(Guangxi)	62	43.8688	6.6616	0.6815	366.2434	0.8648

续表

方程 (equations)	地区 (district)	样本数 (number of samples)	参数(parameters)			RSS	R^2
			a	b	c		
Richards	福建(Fujian)	57	23.3176	0.0869	1.5982	1226.4410	0.6288
Richards	贵州(Guizhou)	62	22.7054	0.0927	1.6735	762.5284	0.7199
Richards	湖南(Hunan)	91	29.1024	0.0601	1.4976	644.2180	0.8530
Richards	广西(Guangxi)	62	27.7197	0.0689	1.3787	365.1799	0.8652
Weibull	福建(Fujian)	57	22.5201	0.0246	1.3572	1224.1080	0.6295
Weibull	贵州(Guizhou)	62	22.2845	0.0258	1.346	763.5321	0.7195
Weibull	湖南(Hunan)	91	28.3397	0.0186	1.3006	642.9181	0.8533
Weibull	广西(Guangxi)	62	27.0750	0.0292	1.2286	365.5091	0.8651
Schumacher	福建(Fujian)	57	28.9777	10.4236	—	1243.5050	0.6241
Schumacher	贵州(Guizhou)	62	28.2801	10.1664	—	768.2012	0.7179
Schumacher	湖南(Hunan)	91	34.1850	13.5230	—	689.1784	0.8442
Schumacher	广西(Guangxi)	62	32.8338	11.0809	—	384.5080	0.8491
Logistic	福建(Fujian)	57	21.6730	2.0040	0.1691	1227.7740	0.6284
Logistic	贵州(Guizhou)	62	21.4865	2.0421	0.1744	777.1189	0.7147
Logistic	湖南(Hunan)	91	26.8332	2.0490	0.1293	679.5863	0.8452
Logistic	广西(Guangxi)	62	25.2367	1.9073	0.1485	385.1749	0.8580
K_c	福建(Fujian)	57	83.9088	—	0.4244	30.6456	0.9861
K_c	贵州(Guizhou)	62	49.2696	—	0.5929	29.1045	0.9820
K_c	湖南(Hunan)	91	42.3445	—	0.6776	17.0259	0.9954
K_c	广西(Guangxi)	62	37.3666	—	0.7693	24.8752	0.9831
R_{c_1}	福建(Fujian)	57	32.2117	—	1.1977	33.7071	0.9849
R_{c_1}	贵州(Guizhou)	62	26.9978	—	1.3831	29.9905	0.9816
R_{c_1}	湖南(Hunan)	91	28.4622	—	1.482	16.4811	0.9955
R_{c_1}	广西(Guangxi)	62	26.6448	—	1.6179	31.1452	0.9790
W_{c_1}	福建(Fujian)	57	31.8248	—	1.1291	34.7068	0.9842
W_{c_1}	贵州(Guizhou)	62	26.6778	—	1.2275	32.3148	0.9800
W_{c_1}	湖南(Hunan)	91	28.1431	—	1.2765	17.3965	0.9953

续表

方程 (equations)	地区 (district)	样本数 (number of samples)	参数(parameters)			RSS	R^2
			a	b	c		
W_{c_1}	广西(Guangxi)	62	26.6000	—	1.3258	36.0638	0.9758
Sch_c	福建(Fujian)	57	28.5295	—	—	90.2368	0.9784
Sch_c	贵州(Guizhou)	62	27.8398	—	—	56.3353	0.9793
Sch_c	湖南(Hunan)	91	30.6511	—	—	24.1136	0.9954
Sch_c	广西(Guangxi)	62	29.8150	—	—	32.8641	0.9827
L_c	福建(Fujian)	57	27.9540	—	0.1059	163.3320	0.9273
L_c	贵州(Guizhou)	62	23.8284	—	0.1304	116.7048	0.9312
L_c	湖南(Hunan)	91	27.0510	—	0.1239	40.4422	0.9900
L_c	广西(Guangxi)	62	24.7615	—	0.1788	100.4639	0.9325
R_{c_4}	福建(Fujian)	57	54.4855	0.0113	0.7666	103.1449	0.9513
R_{c_4}	贵州(Guizhou)	62	29.4962	0.0395	1.0595	71.7389	0.9556
R_{c_4}	湖南(Hunan)	91	29.8071	0.0475	1.2005	25.4731	0.9931
R_{c_4}	广西(Guangxi)	62	28.9271	0.0522	0.9301	51.7098	0.9645
W_{c_2}	福建(Fujian)	57	29 276.3700	0.4220	0.0007	59.0100	0.9766
W_{c_2}	贵州(Guizhou)	62	84 144.8500	0.00056	0.1308	45.4478	0.9724
W_{c_2}	湖南(Hunan)	91	2624.7810	0.0180	0.1333	23.3170	0.9936
W_{c_2}	广西(Guangxi)	62	98.0503	1.6657	0.0562	31.9155	0.9781
R_{c_2}	福建(Fujian)	57	49.5540	0.0173	—	65.7365	0.9703
R_{c_2}	贵州(Guizhou)	62	29.1767	0.0441	—	49.4079	0.9693
R_{c_2}	湖南(Hunan)	91	29.4512	0.0519	—	21.3744	0.9942
R_{c_2}	广西(Guangxi)	62	27.3562	0.0739	—	43.8618	0.9699
R_{c_3}	福建(Fujian)	57	—	0.0765	1.4483	13.8031	0.9935
R_{c_3}	贵州(Guizhou)	62	—	0.0723	1.4186	39.0164	0.9776
R_{c_3}	湖南(Hunan)	91	—	0.0874	1.7407	14.9045	0.9959
R_{c_3}	广西(Guangxi)	62	—	0.1207	1.888	30.2416	0.9802
S_c	福建(Fujian)	57	418 049.0000	0.2653	1.4938	16.1878	0.9924

续表

方程 (equations)	地区 (district)	样本数 (number of samples)	参数(parameters)			RSS	R^2
			a	*b*	*c*		
S_c	贵州(Guizhou)	62	136.2661	0.6749	1.2859	27.4568	0.9830
S_c	湖南(Hunan)	91	43.6792	0.7002	1.0236	17.0234	0.9954
S_c	广西(Guangxi)	62	235.1167	1.2449	1.6323	18.9341	0.9870

表 I-3　立地层次时各生长方程模拟参数值及其统计结果

a. Korf 与 K_c 方程

地区 (district)	立地指数 (site index)	Korf					K_c			
		a	*b*	*c*	RSS	R^2	*a*	*c*	RSS	R^2
福建 (Fujian)	10	26.1568	5.0164	0.5533	0.0882	0.9989	25.2553	0.5746	0.1078	0.9972
	12	34.7946	5.7549	0.5587	0.3268	0.9960	30.8955	0.5936	0.8409	0.9765
	14	31.1932	7.3500	0.7273	0.6325	0.9969	39.5240	0.5800	1.1352	0.9887
	16	36.8653	6.4839	0.6779	0.6698	0.9974	37.4125	0.6447	2.0015	0.9826
	18	41.2247	7.0024	0.7031	0.5426	0.9980	48.6105	0.6026	1.1643	0.9906
	20	51.7861	5.8800	0.6061	0.2229	0.9994	62.6982	0.5273	0.5077	0.9972
	22	54.5165	5.4799	0.5810	1.3494	0.9964	53.2343	0.5905	2.1604	0.9866
	24	60.1574	7.3241	0.6951	0.4140	0.9992	64.2509	0.6572	0.8834	0.9967
广西 (Guangxi)	12	15.6990	16.4066	1.3844	0.1178	0.9976	15.1023	1.4662	0.3000	0.9606
	14	16.6012	10.7302	1.2112	0.0130	0.9997	16.1010	1.2542	0.0305	0.9956
	16	85.6577	5.7194	0.4156	1.4532	0.9948	48.5440	0.6193	2.1782	0.9841
	18	39.5034	5.5888	0.6522	2.0466	0.9930	38.3011	0.7250	3.0805	0.9767
	20	29.3272	8.3421	0.9966	1.5055	0.9952	29.3619	1.0322	2.0721	0.9823
	22	31.0497	11.3761	1.1609	1.5873	0.9963	32.0762	1.0620	2.2706	0.9855
	24	36.0730	8.3395	0.9688	1.9103	0.9945	36.7276	0.8782	1.8995	0.9869
贵州 (Guizhou)	10	63703	12.5395	0.1200	0.2060	0.9993	5124232	0.0760	0.9300	0.9967
	12	50.5435	6.7893	0.5232	0.6832	0.9969	64.1880	0.4366	1.1207	0.9916
	14	67.4161	5.8461	0.4356	0.2287	0.9994	70.5481	0.4182	0.4390	0.9979
	16	29.5062	5.7177	0.7548	0.0781	0.9996	29.2501	0.7661	0.1582	0.9979
	18	29.6597	7.5754	0.8947	0.1138	0.9995	29.3444	0.9049	0.2947	0.9961
	20	41.2539	7.0577	0.7649	0.9581	0.9976	42.4150	0.7717	0.9206	0.9949
	22	37.0702	7.6548	0.8974	1.8635	0.9951	35.5613	0.9386	4.2625	0.9712

续表

地区 (district)	立地指数 (site index)	Korf					K_c			
		a	*b*	*c*	RSS	R^2	*a*	*c*	RSS	R^2
湖南 (Hunan)	12	28.1307	6.7980	0.6920	0.7252	0.9950	37.3705	0.5582	1.1184	0.9896
	14	27.6265	6.8481	0.7762	0.3607	0.9980	31.2029	0.7030	0.5779	0.9956
	16	87.4769	8.0387	0.5048	0.8565	0.9967	158.5225	0.3842	0.7651	0.9962
	18	34.2175	8.2858	0.8416	0.4389	0.9986	38.2698	0.7509	0.6409	0.9971
	20	32.5315	13.4642	1.0582	4.7779	0.9958	35.1496	0.8904	4.5002	0.9951
	22	37.4472	11.1821	1.0084	3.4333	0.9962	38.9920	0.8842	5.1695	0.9925

b. Richards 与 R_{c_1} 方程

地区 (district)	立地指数 (site index)	Richards					R_{c_1}			
		a	*b*	*c*	RSS	R^2	*a*	*c*	RSS	R^2
福建 (Fujian)	10	15.0017	0.0583	1.0633	0.2391	0.9972	14.4074	1.2146	0.2581	0.9932
	12	16.8595	0.0750	1.3774	0.3456	0.9958	15.8394	1.4667	0.7472	0.9808
	14	19.7012	0.0792	1.5807	0.2004	0.9990	19.9983	1.4954	0.4785	0.9949
	16	22.7017	0.0746	1.4088	0.6722	0.9974	21.5912	1.5001	1.4452	0.9879
	18	25.3592	0.0789	1.5382	0.3824	0.9986	25.8410	1.5084	0.7096	0.9941
	20	29.5003	0.0674	1.2889	0.2266	0.9994	29.7345	1.3276	0.5370	0.9968
	22	30.6409	0.0652	1.2003	1.7756	0.9953	29.6003	1.3275	2.1453	0.9870
	24	35.2671	0.0797	1.6252	0.3796	0.9993	34.7447	1.7243	1.0820	0.9954
广西 (Guangxi)	12	12.5186	0.2132	3.6214	0.2204	0.9955	12.2659	4.0557	0.4794	0.9338
	14	12.7704	0.2015	2.7822	0.0226	0.9994	12.5792	2.8827	0.0515	0.9920
	16	31.0817	0.0418	1.1143	1.9969	0.9928	26.7686	1.5483	3.3936	0.9750
	18	26.0346	0.0626	1.1141	3.5677	0.9879	25.6600	1.4949	4.8355	0.9630
	20	24.3346	0.0959	1.4442	3.7548	0.9880	24.1311	1.9523	3.7889	0.9682
	22	26.7432	0.1165	1.8484	1.9427	0.9955	26.1871	2.0962	2.2242	0.9820
	24	28.2173	0.1113	1.7298	0.4561	0.9987	27.9859	1.6562	0.6018	0.9956
贵州 (Guizhou)	10	59.5427	0.0130	1.2052	0.2299	0.9994	68.2299	1.1344	0.8073	0.9970
	12	22.0205	0.0552	1.4388	0.2726	0.9987	21.9257	1.3721	0.5233	0.9956
	14	27.2176	0.0391	1.1153	0.2173	0.9994	26.0933	1.1941	0.4031	0.9981
	16	21.5712	0.0786	1.1872	0.5307	0.9972	21.1401	1.3752	0.6410	0.9914

续表

地区 (district)	立地指数 (site index)	Richards					R_{c_1}			
		a	*b*	*c*	RSS	R^2	*a*	*c*	RSS	R^2
贵州 (Guizhou)	18	22.4603	0.0996	1.5654	0.3814	0.9982	22.0953	1.7877	0.9768	0.9870
	20	28.8256	0.0745	1.3776	2.7657	0.9931	28.6134	1.7087	2.5470	0.9857
	22	28.2275	0.0962	1.5246	2.9607	0.9923	27.1499	1.8796	5.0897	0.9658
湖南 (Hunan)	12	15.7812	0.0949	1.6704	0.5186	0.9964	16.4849	1.5563	0.9995	0.9905
	14	17.8193	0.1019	1.6149	0.4895	0.9973	18.1445	1.6537	0.5889	0.9954
	16	24.5707	0.0744	1.9493	0.5383	0.9979	26.2731	1.7320	0.5790	0.9971
	18	21.9471	0.1126	1.9548	0.2080	0.9993	22.1727	1.9168	0.4985	0.9978
	20	26.9631	0.0843	1.8301	7.3690	0.9936	27.4908	1.8229	4.9071	0.9947
	22	28.6750	0.1033	1.9720	2.6218	0.9971	29.1894	1.9011	4.2303	0.9938

c. Weibull 与 W_c方程

地区 (district)	立地指数 (site index)	Weibull					W_c			
		a	*b*	*c*	RSS	R^2	*a*	*c*	RSS	R^2
福建 (Fujian)	10	15.0198	0.0505	1.0318	0.2458	0.9971	14.2438	1.1308	0.2912	0.9921
	12	16.2183	0.0322	1.2421	0.3577	0.9956	15.1309	1.3030	0.7491	0.9807
	14	19.0440	0.0231	1.3387	0.1840	0.9991	19.1297	1.3292	0.3906	0.9959
	16	22.1460	0.0306	1.2405	0.7403	0.9971	20.8700	1.3156	1.4232	0.9882
	18	24.5687	0.0252	1.3127	0.4638	0.9983	24.7966	1.3270	0.7587	0.9937
	20	28.8710	0.0346	1.1785	0.2828	0.9993	28.8316	1.2156	0.6273	0.9963
	22	30.2987	0.0411	1.1190	1.8569	0.9951	28.9458	1.2069	2.2582	0.9862
	24	33.8231	0.0214	1.3667	0.5252	0.9990	32.9764	1.4408	1.5503	0.9934
广西 (Guangxi)	12	11.8894	0.0107	2.0038	0.3567	0.9928	11.5729	2.1800	0.6776	0.9041
	14	12.0629	0.0197	1.7980	0.0327	0.9992	11.9075	1.8250	0.0720	0.9879
	16	30.7811	0.0307	1.0741	2.0338	0.9927	25.9291	1.3320	3.8501	0.9714
	18	26.1336	0.0494	1.0508	3.6637	0.9876	25.2998	1.2728	5.4269	0.9579
	20	24.2242	0.0435	1.2024	4.3446	0.9863	23.9566	1.4569	5.1154	0.9570
	22	26.4839	0.0292	1.3762	2.7209	0.9939	26.6000	1.5163	3.7425	0.9774
	24	27.6063	0.0293	1.3835	0.2920	0.9992	27.4443	1.3724	0.5691	0.9957

续表

地区 (district)	立地指数 (site index)	Weibull					W_c			
		a	*b*	*c*	RSS	R^2	*a*	*c*	RSS	R^2
贵州 (Guizhou)	10	51.3291	0.0063	1.1832	0.2196	0.9994	58.9677	1.1284	0.7939	0.9971
	12	20.8741	0.0184	1.2969	0.2126	0.9990	20.7083	1.2739	0.4277	0.9964
	14	26.8339	0.0283	1.0792	0.2296	0.9994	25.4966	1.1361	0.4355	0.9979
	16	21.4869	0.0533	1.0981	0.5988	0.9969	20.9251	1.2083	0.8374	0.9886
	18	22.0927	0.0344	1.2925	0.5518	0.9975	21.6567	1.4124	1.5339	0.9797
	20	28.5546	0.0344	1.1949	3.2031	0.9922	27.9473	1.3901	3.5791	0.9795
	22	27.8188	0.0359	1.2670	3.3852	0.9912	26.6253	1.4574	5.8902	0.9591
湖南 (Hunan)	12	14.9047	0.0246	1.4056	0.4844	0.9967	15.3779	1.3740	0.9728	0.9908
	14	17.2069	0.0315	1.3431	0.5763	0.9969	17.3756	1.3798	0.6218	0.9952
	16	20.8766	0.0092	1.6406	0.4113	0.9984	21.9665	1.5486	0.5059	0.9975
	18	21.0237	0.0195	1.5213	0.3030	0.9992	20.8713	1.5262	0.4992	0.9978
	20	26.6897	0.0189	1.3781	10.2338	0.9913	27.4145	1.3582	5.7067	0.9942
	22	27.9833	0.0192	1.4628	3.7316	0.9959	28.5732	1.4769	4.4107	0.9936

d. Logistic 与 L_c 方程

地区 (district)	立地指数 (site index)	Logistic					L_c			
		a	*b*	*c*	RSS	R^2	*a*	*c*	RSS	R^2
福建 (Fujian)	10	13.2790	1.5929	0.1399	1.1877	0.986	12.6987	0.1732	1.4194	0.9624
	12	14.2535	2.0122	0.1887	0.716	0.9913	13.5822	0.2158	1.1762	0.966
	14	17.9626	2.0747	0.1651	1.0079	0.9952	17.6333	0.1853	1.3102	0.9868
	16	20.5038	1.9178	0.1602	2.4719	0.9906	19.4415	0.1964	2.6663	0.9781
	18	22.8542	2.075	0.1713	2.1554	0.9923	22.5962	0.19	3.2167	0.9751
	20	26.1482	1.8433	0.1543	2.8104	0.9928	25.5403	0.1782	4.3662	0.9752
	22	26.8015	1.7658	0.1561	5.0352	0.9868	26.2642	0.1812	6.2085	0.9624
	24	31.3989	2.1698	0.1758	3.9418	0.9928	30.2524	0.2068	8.4686	0.9656
广西 (Guangxi)	12	11.6704	3.0959	0.384	0.4516	0.9908	11.5692	0.4059	0.6757	0.904
	14	11.8811	2.6103	0.3563	0.0437	0.9989	11.7882	0.3613	0.087	0.9849
	16	24.3031	1.8272	0.1294	5.9403	0.9789	23.1246	0.1802	9.4242	0.9341
	18	23.4535	1.5935	0.1403	9.2071	0.9689	23.0597	0.1892	11.7435	0.9112

地区 (district)	立地指数 (site index)	Logistic					L_c			
		a	b	c	RSS	R^2	a	c	RSS	R^2
广西 (Guangxi)	20	23.3777	1.7177	0.1681	9.7881	0.9691	22.8572	0.2335	10.5557	0.9101
	22	26.0347	2.0048	0.1935	6.5867	0.9851	25.2592	0.2438	7.6513	0.9518
	24	26.9737	2.0027	0.1975	1.2243	0.9966	26.662	0.218	2.8019	0.979
贵州 (Guizhou)	10	24.8814	2.4272	0.098	1.5711	0.9961	24.8987	0.1003	2.3576	0.9932
	12	18.7176	2.1378	0.1395	0.8508	0.9962	18.3557	0.152	1.7164	0.9873
	14	22.7566	1.8136	0.1089	3.2127	0.9913	21.9805	0.1261	4.5012	0.9809
	16	20.2102	1.5846	0.1559	2.8997	0.985	19.7394	0.1898	3.8298	0.9503
	18	21.1914	1.9149	0.1867	2.5326	0.9884	20.7036	0.2256	4.878	0.9379
	20	26.494	1.8524	0.1549	9.7812	0.9759	25.9439	0.1976	12.1399	0.933
	22	26.6249	1.8481	0.1773	7.8354	0.9798	25.546	0.2357	10.2559	0.928
湖南 (Hunan)	12	13.794	2.1497	0.2091	0.5615	0.9961	13.8793	0.2136	0.8744	0.9919
	14	15.9824	2.0038	0.2098	1.5059	0.9919	15.9732	0.2218	1.0473	0.9923
	16	18.0252	2.7266	0.2186	0.1754	0.9993	18.1938	0.216	0.2199	0.999
	18	19.6837	2.2729	0.2262	1.063	0.9967	19.6525	0.2366	0.9379	0.9962
	20	25.9182	2.1677	0.1568	23.0115	0.9803	26.4041	0.1386	10.2662	0.9908
	22	26.8426	2.2231	0.1925	9.827	0.9893	27.7458	0.1902	5.9416	0.9922

e. Schumacher 与 Sch_c方程

地区 (district)	立地指数 (site index)	Schumacher				Sch_c		
		a	b	RSS	R^2	a	RSS	R^2
福建 (Fujian)	10	16.4651	9.1577	1.1238	0.9876	15.3130	0.9382	0.9928
	12	19.5240	9.7518	1.0247	0.9882	17.8682	1.6332	0.9826
	14	24.4639	11.3475	1.4381	0.9938	22.1532	3.0583	0.9752
	16	27.3080	10.5277	2.0512	0.9928	24.4832	3.4711	0.9758
	18	31.0836	10.9688	1.8834	0.9939	28.9912	4.1560	0.9824
	20	34.2892	10.2883	3.3786	0.9922	31.3292	4.6241	0.9854
	22	34.7690	9.6398	4.7462	0.9883	31.9944	5.3140	0.9823
	24	43.9068	11.5401	2.7831	0.9955	41.0334	4.7937	0.9868

续表

地区 (district)	立地指数 (site index)	Schumacher				Sch_c		
		a	*b*	RSS	R^2	*a*	RSS	R^2
广西 (Guangxi)	12	20.2061	9.6636	0.2896	0.9943	20.9320	0.9502	0.9340
	14	19.2494	8.2532	0.0476	0.9988	19.4243	0.1474	0.9835
	16	31.0798	12.1602	8.0773	0.9739	28.7236	4.6292	0.9871
	18	29.3182	9.4433	4.6718	0.9847	28.9608	4.3128	0.9799
	20	29.2791	8.3714	1.5058	0.9952	30.0155	2.0894	0.9820
	22	33.1009	8.5480	2.3707	0.9946	33.3897	2.3584	0.9859
	24	35.4279	8.7644	1.9344	0.9945	33.4950	2.2430	0.9834
贵州 (Guizhou)	10	36.7195	24.7520	10.1544	0.9823	25.4955	18.5499	0.9783
	12	25.9251	14.1237	3.1729	0.9884	21.9660	5.2611	0.9725
	14	29.1616	13.8161	7.0085	0.9843	24.6191	6.4502	0.9868
	16	24.9905	8.2336	0.8624	0.9957	24.1500	0.7796	0.9964
	18	27.7182	8.9023	0.2561	0.9989	27.2676	0.4240	0.9958
	20	34.4255	10.3113	2.4313	0.9942	33.8085	2.2399	0.9964
	22	34.7507	9.0210	2.1403	0.9944	33.8162	4.3310	0.9722
湖南 (Hunan)	12	19.8970	10.1668	1.3049	0.9914	19.1585	1.5054	0.9878
	14	22.4358	9.2319	0.7384	0.9961	22.2294	0.7993	0.9953
	16	30.5041	14.4471	2.8649	0.9905	27.5463	2.1251	0.9939
	18	29.4276	10.3250	0.7420	0.9978	28.4989	0.8830	0.9969
	20	33.4309	11.9720	5.0435	0.9956	32.9415	4.6799	0.9951
	22	37.6496	11.0212	3.4372	0.9962	35.9608	5.3638	0.9925

f. R_{c_4} 与 W_{c_2} 方程

地区 (district)	立地指数 (site index)	R_{c_4}					W_{c_2}				
		a	*b*	*c*	RSS	R^2	*a*	*b*	*c*	RSS	R^2
福建 (Fujian)	10	17.5676	0.0285	0.5882	0.1094	0.9971	20.8331	0.1961	0.5235	0.1040	0.9972
	12	15.7324	0.0895	1.6197	0.7286	0.9810	15.5126	0.0364	1.2332	0.7294	0.9809

续表

地区 (district)	立地指数 (site index)	R_{c_4}					W_{c_2}				
		a	*b*	*c*	RSS	R^2	*a*	*b*	*c*	RSS	R^2
福建 (Fujian)	14	19.0288	0.1000	3.8750	0.2941	0.9969	18.6580	0.0161	1.4696	0.2849	0.9970
	16	21.1688	0.0972	2.2643	1.3102	0.9892	20.9875	0.0279	1.3133	1.3270	0.9890
	18	25.5994	0.0790	1.6275	0.6133	0.9949	25.3015	0.0309	1.2318	0.6359	0.9947
	20	31.5208	0.0528	0.9657	0.4104	0.9976	31.6422	0.0581	0.9756	0.4103	0.9976
	22	31.4925	0.0558	0.9096	1.9704	0.9879	31.6468	0.0708	0.9424	1.9712	0.9879
	24	37.4505	0.0612	1.0769	0.6836	0.9972	36.7299	0.0463	1.0817	0.6739	0.9973
广西 (Guangxi)	12	39.4285	0.0014	0.3151	0.3987	0.9999	19.7801	1.7257	0.2096	0.1970	0.9738
	14	30.9965	0.0118	0.5061	0.2652	0.9938	17.9412	0.9411	0.3380	0.0231	0.9970
	16	69.1759	0.0045	0.5336	1.4960	0.9888	420.4464	0.2082	0.0873	2.1087	0.9879
	18	99.3283	0.0009	0.4025	2.2759	0.9822	72.3398	0.4668	0.2061	2.5814	0.9800
	20	26.6435	0.0481	0.5246	2.0117	0.9826	29.2047	0.5983	0.4086	1.9725	0.9830
	22	26.8984	0.0980	1.0398	1.7551	0.9887	26.9209	0.0926	1.0116	1.7565	0.9887
	24	27.9059	0.1177	2.2858	0.5460	0.9959	27.5791	0.0313	1.3586	0.4774	0.9964
贵州 (Guizhou)	10	38.7743	0.0277	1.8812	0.3999	0.9985	34.9291	0.0046	1.4106	0.3527	0.9987
	12	20.4589	0.0740	2.8358	0.3577	0.9970	19.7521	0.0117	1.4659	0.3051	0.9974
	14	27.7826	0.0346	0.9461	0.2991	0.9986	27.7367	0.0396	0.9739	0.3010	0.9986
	16	23.2564	0.0469	0.5937	0.1661	0.9977	24.8484	0.2592	0.5815	0.1576	0.9979
	18	24.2057	0.0589	0.6766	0.1810	0.9976	24.8650	0.1944	0.7089	0.2130	0.9972
	20	34.0004	0.0346	0.6242	1.0316	0.9940	40.1788	0.2471	0.5049	0.9243	0.9947
	22	29.6403	0.0636	0.7043	4.0536	0.9724	29.9615	0.1680	0.7700	4.1025	0.9721
湖南 (Hunan)	12	14.9681	0.1352	1.0989	0.6817	0.9935	14.0592	0.0090	1.7920	0.7879	0.9926
	14	18.9048	0.0827	1.1484	0.5413	0.9958	18.7314	0.0591	1.0900	0.5416	0.9958
	16	21.0565	0.1179	2.6279	0.2687	0.9986	18.2776	0.0025	2.1717	0.1839	0.9991
	18	21.8776	0.1178	2.3444	0.4672	0.9979	21.1357	0.0238	1.4550	0.4556	0.9980
	20	27.8853	0.0633	1.1128	4.2820	0.9953	28.1218	0.0584	1.0005	4.3089	0.9953
	22	28.9767	0.1059	2.4853	3.5041	0.9949	28.6389	0.0220	1.4059	3.4829	0.9949

g. S_c方程

地区 (district)	立地指数 (site index)	S_c				
		a	*b*	*c*	RSS	R^2
福建 (Fujian)	10	28.7894	0.5977	1.0583	0.1073	0.9972
	12	16.1193	0.2517	0.3461	0.7288	0.9813
	14	19.1189	0.1548	0.1372	0.2984	0.9968
	16	21.3874	0.2036	0.2408	1.3034	0.9892
	18	26.4140	0.2462	0.3716	0.5948	0.9951
	20	35.5718	0.3612	0.6421	0.4180	0.9976
	22	33.7604	0.3657	0.6086	1.9936	0.9878
	24	42.9722	0.4476	0.6913	0.7749	0.9969
广西 (Guangxi)	12	20.1302	2.7311	1.4465	0.2804	0.9642
	14	29.8954	2.4970	1.6081	0.0275	0.9971
	16	81.8290	0.7069	1.1846	2.1377	0.9845
	18	55.8079	0.8752	1.2050	3.0132	0.9774
	20	33.4166	1.3172	1.1755	2.0441	0.9825
	22	27.4277	0.4817	0.5396	1.7650	0.9886
	24	28.0170	0.2227	0.2084	0.5902	0.9956
贵州 (Guizhou)	10	39.1212	0.1059	0.3208	0.4493	0.9983
	12	20.6094	0.1406	0.1877	0.3779	0.9968
	14	32.1659	0.2990	0.6531	0.3414	0.9984
	16	29.5442	0.7749	1.0096	0.1582	0.9979
	18	28.7861	0.8748	0.9755	0.2944	0.9961
	20	58.7902	0.9307	1.1878	0.8874	0.9951
	22	32.7059	0.7750	0.8695	4.2458	0.9714
湖南 (Hunan)	12	14.6754	0.1303	0.0000	0.8847	0.9918
	14	20.3245	0.4022	0.5647	0.5472	0.9958
	16	20.6058	0.1219	0.0000	0.2822	0.9986
	18	22.1829	0.2504	0.2602	0.4755	0.9979
	20	28.9545	0.4287	0.5996	4.0519	0.9956
	22	29.0923	0.2093	0.2132	3.5632	0.9948

附录 II　Richards 等 6 种理论生长方程模拟林分直径分布的参数表

表 II-1　Gompertz、Logistic 和 Richards 理论生长方程模拟林分直径分布的参数表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	b	R^2	p	q	R^2	b	k	m	R^2
na16	7.6311	0.9233	0.9979	10.2971	1.1734	0.9995	−2 214 115.3520	1.5300	2.9280	1.0000
na17	6.7790	0.6883	0.9960	10.0277	0.9546	0.9996	−126 075.8756	1.0690	2.3766	0.9996
na18	7.1236	0.6507	0.9982	10.8003	0.9255	0.9998	−54 894.4543	0.9324	2.0218	0.9998
na19	7.3099	0.6195	0.9967	10.8915	0.8684	0.9993	−158 170.7595	0.9295	2.2221	0.9992
na10	8.0444	0.6378	0.9990	11.8297	0.8867	0.9994	−63 007.5054	0.8452	1.8571	0.9995
na112	7.6756	0.5642	0.9985	11.3268	0.7852	0.9958	−160.9018	0.5771	1.0604	0.9985
na114	7.3740	0.4959	0.9976	10.9466	0.6927	0.9985	−16 982.1538	0.6410	1.7616	0.9987
na116	7.1738	0.4717	0.9983	10.7361	0.6637	0.9980	−4159.7810	0.5674	1.5355	0.9987
na118	6.5173	0.4216	0.9986	9.7382	0.5883	0.9964	−150.6000	0.4430	1.1465	0.9985
na120	6.7863	0.4338	0.9993	10.2441	0.6129	0.9982	−772.8903	0.4858	1.3183	0.9994
na26	4.9066	0.7792	0.9944	7.3460	1.0619	0.9969	−916.1984	1.0171	1.8656	0.9969
na27	6.0418	0.7770	0.9952	8.8805	1.0648	0.9996	−12 717.4906	1.1097	2.1365	0.9997
na28	5.7312	0.6509	0.9965	8.9533	0.9381	0.9995	−455.0907	0.7625	1.4191	0.9986
na29	6.5549	0.6583	0.9936	9.6957	0.9109	0.9992	−394 496.0000	1.1255	2.7007	0.9998
na210	6.0848	0.5807	0.9900	9.2973	0.8227	0.9965	−308 429.2088	1.0350	2.7288	0.9971
na212	6.8361	0.5847	0.9944	10.6079	0.8498	0.9997	−124 925.2432	0.9146	2.2262	0.9998
na214	7.1411	0.5662	0.9964	10.8778	0.8085	0.9983	−60 563.7718	0.8156	2.0254	0.9983
na216	6.9082	0.5154	0.9977	10.5495	0.7376	0.9992	−14 219.5733	0.6905	1.8043	0.9994
na218	6.8129	0.4774	0.9982	10.3499	0.6789	0.9985	−16 696.2030	0.6655	1.7560	0.9986
na220	6.3343	0.4396	0.9975	9.6446	0.6231	0.9982	−3225.6881	0.5581	1.6727	0.9986
na36	4.7784	0.6014	0.9898	7.4243	0.8507	0.9946	−10 178.5227	0.9837	2.4718	0.9949
na37	5.1676	0.5412	0.9936	8.1301	0.7800	0.9987	−55 975.0297	0.9635	2.6861	0.9992
na38	5.1729	0.4805	0.9874	8.2252	0.6982	0.9937	−2 355 148.1800	1.0960	3.4850	0.9956
na39	6.0228	0.5043	0.9912	9.2782	0.7201	0.9969	−1 567 557.6450	1.0030	3.0870	0.9978

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	*b*	R^2	*p*	*q*	R^2	*b*	*k*	*m*	R^2
na310	5.7337	0.4600	0.9920	8.9565	0.6631	0.9963	−333 583.9733	0.8641	2.8188	0.9969
na312	6.6999	0.4827	0.9957	10.1430	0.6832	0.9994	−442 853.3448	0.8235	2.5906	0.9997
na314	6.5790	0.4411	0.9921	10.2265	0.6399	0.9972	−10 362 121.3900	0.9200	3.1500	0.9984
na316	6.9176	0.4421	0.9920	10.6999	0.6408	0.9980	−1 891 710.7290	0.8110	2.7180	0.9990
na318	6.5733	0.4093	0.9912	10.2802	0.5978	0.9972	−563 636.7667	0.7257	2.5857	0.9979
na320	6.2073	0.3860	0.9903	9.7550	0.5634	0.9959	−188 889.2068	0.6632	2.4981	0.9963
nb16	5.0045	0.7600	0.9935	7.3019	1.0131	0.9976	−14 430 611.5100	1.9400	4.2600	0.9998
nb17	5.2598	0.6796	0.9856	8.1608	0.9719	0.9959	−38 576 671.0800	1.7800	4.3200	0.9997
nb18	4.9025	0.5744	0.9914	7.4224	0.7945	0.9977	−657 623.4955	1.2460	3.5129	0.9999
nb19	5.1891	0.5574	0.9890	8.0272	0.7912	0.9967	−23 415 615.3200	1.4400	4.1900	0.9999
nb110	5.1550	0.5318	0.9919	7.9740	0.7549	0.9983	−881 372.9191	1.1404	3.4054	1.0000
nb112	5.1828	0.4916	0.9920	7.9023	0.6881	0.9985	−155 719.2626	0.9336	3.0062	0.9998
nb114	4.6807	0.4138	0.9917	7.3582	0.5914	0.9985	−45 783.2207	0.7752	2.8653	0.9996
nb116	4.2780	0.3788	0.9922	6.8179	0.5439	0.9984	−131 613.0559	0.8154	3.3157	0.9991
nb118	3.9875	0.3422	0.9927	6.3341	0.4868	0.9991	−2026.3360	0.5467	2.3672	0.9994
nb120	3.8031	0.3285	0.9913	6.0771	0.4679	0.9984	−1505.0934	0.5248	2.3664	0.9986
nb26	3.3815	0.6878	0.9956	5.5467	0.9884	0.9997	−858.7094	1.1164	2.3601	0.9999
nb27	4.8652	0.8058	0.9972	6.8438	1.0391	0.9997	−3510.4582	1.1610	2.3772	0.9998
nb28	4.7513	0.7084	0.9979	7.3482	0.9957	0.9999	−2584.4172	1.0399	2.1260	0.9999
nb29	4.7438	0.6379	0.9955	7.5447	0.9235	0.9997	−4165.1224	0.9849	2.2048	0.9997
nb210	4.9333	0.6128	0.9935	7.5325	0.8563	0.9993	−22 588.1337	1.0447	2.6396	0.9999
nb212	4.8303	0.5411	0.9947	7.4799	0.7637	0.9993	−8460.6387	0.8680	2.3982	0.9995
nb214	4.6155	0.4823	0.9916	7.2525	0.6879	0.9983	−76 665.2244	0.9455	3.0413	0.9996
nb216	4.3725	0.4317	0.9899	6.9200	0.6164	0.9973	−165 493.3132	0.9262	3.3653	0.9993
nb218	4.3015	0.4080	0.9918	6.8320	0.5840	0.9982	−45 576.4647	0.8071	3.0479	0.9995
nb220	3.9529	0.3756	0.9880	6.3547	0.5394	0.9968	−54 313.8868	0.7939	3.3085	0.9989
nb36	4.3176	0.7038	0.9956	6.4438	0.9486	0.9985	−2200.9765	1.0593	2.3604	0.9986
nb37	4.4247	0.6209	0.9965	7.0068	0.8886	0.9997	−4246.0963	0.9973	2.3601	0.9998
nb38 .	4.3361	0.5271	0.9970	6.8183	0.7480	0.9988	−542.0737	0.7145	1.8625	0.9989
nb39	4.8177	0.5318	0.9964	7.4179	0.7468	0.9997	−5783.9867	0.8275	2.3218	0.9998

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	*b*	R^2	*p*	*q*	R^2	*b*	*k*	*m*	R^2
nb310	5.0651	0.5353	0.9970	7.8005	0.7555	0.9997	−5146.4085	0.8020	2.1875	0.9997
nb312	4.6218	0.4457	0.9955	7.2484	0.6345	0.9994	−2965.8659	0.6758	2.1925	0.9994
nb314	4.3927	0.4028	0.9939	6.9935	0.5790	0.9985	−4912.6114	0.6591	2.3945	0.9988
nb316	4.2421	0.3463	0.9897	6.7235	0.4958	0.9910	−182.6915	0.4340	1.6112	0.9918
nb318	4.2024	0.3589	0.9909	6.7770	0.5211	0.9967	−1205.2483	0.5359	2.0855	0.9967
nb320	4.1998	0.3598	0.9919	6.7625	0.5216	0.9972	−1047.0253	0.5305	2.0516	0.9972
nc16	2.9174	0.5820	0.9856	5.0235	0.8584	0.9949	−16 977.3642	1.3598	3.5402	0.9980
nc17	3.5373	0.5876	0.9879	5.6738	0.8330	0.9967	−30 493.4116	1.2675	3.4250	0.9987
nc18	3.4240	0.5128	0.9917	5.5741	0.7330	0.9979	−3492.4516	0.9411	2.7833	0.9988
nc19	3.6678	0.5071	0.9869	5.9410	0.7272	0.9963	−62 672.7529	1.1304	3.5654	0.9990
nc110	3.8161	0.4974	0.9905	6.1287	0.7107	0.9975	−10 878.0720	0.9419	2.9384	0.9985
nc112	3.6186	0.4402	0.9887	5.8452	0.6283	0.9960	−26 798.1080	0.9273	3.3143	0.9978
nc114	3.6189	0.4179	0.9900	5.8618	0.5982	0.9971	−7112.9954	0.7892	2.9063	0.9982
nc116	3.7249	0.4079	0.9933	6.0439	0.5872	0.9987	−2025.7248	0.6802	2.4538	0.9991
nc118	3.8002	0.4032	0.9952	6.1444	0.5800	0.9994	−873.7553	0.6153	2.1776	0.9994
nc120	3.7232	0.3923	0.9960	6.0194	0.5633	0.9994	−410.8348	0.5632	1.9996	0.9994
nc26	4.2805	1.0231	0.9979	5.9297	1.2756	0.9995	−2820.9985	1.5222	2.6570	0.9999
nc27	3.6061	0.7157	0.9929	6.2837	1.0634	0.9991	−6612.0507	1.3709	2.7590	1.0000
nc28	4.9488	0.8261	0.9958	6.7615	1.0390	0.9994	−12021.0097	1.2941	2.7642	1.0000
nc29	4.3838	0.6892	0.9969	6.6384	0.9427	0.9995	−1903.3764	1.0223	2.2476	0.9996
nc210	4.4367	0.6416	0.9969	6.9797	0.9124	0.9997	−1714.0396	0.9505	2.1216	0.9996
nc212	3.8529	0.5066	0.9933	6.1928	0.7258	0.9991	−3060.3283	0.8580	2.5303	0.9995
nc214	3.5804	0.4430	0.9944	5.7716	0.6315	0.9994	−1105.7033	0.7114	2.3692	0.9996
nc216	3.6826	0.4184	0.9924	5.9063	0.5951	0.9987	−2586.8429	0.7143	2.5856	0.9993
nc218	3.4905	0.3867	0.9968	5.6579	0.5524	0.9991	−136.7104	0.5141	1.7860	0.9992
nc220	3.5460	0.3834	0.9968	5.7306	0.5469	0.9984	−111.0530	0.4959	1.7102	0.9987
nc36	3.5960	0.7887	0.9965	5.6907	1.0975	0.9993	−2913.5470	1.3687	2.6643	0.9997
nc37	2.7504	0.5077	0.9817	4.6235	0.7275	0.9834	−24.7602	0.6289	1.5656	0.9839
nc38	4.6982	0.7445	0.9934	6.6746	0.9653	0.9982	−88 669.3351	1.4206	3.3228	0.9999
nc39	3.8504	0.5737	0.9927	6.1427	0.8146	0.9985	−4272.7523	0.9986	2.6374	0.9992

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	b	R^2	p	q	R^2	b	k	m	R^2
nc310	3.6569	0.5126	0.9852	5.9789	0.7418	0.9962	−50 821.2612	1.1346	3.4551	0.9991
nc312	3.5144	0.4478	0.9863	5.7370	0.6445	0.9969	−27 724.3461	0.9663	3.3876	0.9994
nc314	3.3747	0.0403	0.9892	5.4880	0.5762	0.9981	−4088.8303	0.7563	2.8972	0.9994
nc316	3.4316	0.3851	0.9899	5.6469	0.5572	0.9975	−1745.8471	0.6646	2.5522	0.9981
nc318	3.3021	0.3501	0.9933	5.4349	0.5040	0.9978	−348.1560	0.5256	2.1268	0.9979
nc320	3.6518	0.3689	0.9965	5.8673	0.5252	0.9982	−125.0085	0.4764	1.7058	0.9985
nd16	4.1106	0.9809	0.9986	5.7669	1.2349	0.9998	−1463.8658	1.4173	2.4943	1.0000
nd17	3.3873	0.7253	0.9961	5.4178	1.0267	0.9993	−1822.4682	1.2570	2.5963	0.9997
nd18	3.6053	0.6647	0.9919	6.0887	0.9928	0.9990	−4776.5400	1.2351	2.7075	0.9999
nd19	4.0222	0.6749	0.9938	6.1404	0.9270	0.9993	−5204.6079	1.1517	2.7219	0.9999
nd110	3.9161	0.6308	0.9954	6.0131	0.8664	0.9992	−3580.8985	1.0583	2.6395	0.9996
nd112	3.6171	0.5288	0.9937	5.7343	0.7429	0.9992	−1824.6453	0.8813	2.5345	0.9997
nd114	3.5154	0.4956	0.9938	5.5867	0.6957	0.9992	−2552.6168	0.8649	2.7016	0.9999
nd116	3.2769	0.4414	0.9954	5.3511	0.6303	0.9992	−317.6509	0.6570	2.1257	0.9992
nd118	3.2364	0.4132	0.9965	5.3280	0.5943	0.9992	−112.6378	0.5591	1.8195	0.9993
nd120	3.2926	0.4028	0.9960	5.4125	0.5791	0.9992	−167.7888	0.5624	1.9131	0.9992
nd26	2.4208	0.6920	0.9887	4.2845	1.0276	0.9992	−218.6254	1.1586	2.4190	0.9997
nd27	2.8127	0.6578	0.9946	4.5058	0.9040	0.9990	−238.6374	1.0048	2.3356	0.9992
nd28	2.8583	0.6000	0.9918	4.6788	0.8433	0.9989	−759.9590	1.0407	2.6673	0.9997
nd29	2.9670	0.5691	0.9923	4.9014	0.8112	0.9990	−856.0685	0.9827	2.6290	0.9996
nd210	2.8955	0.5152	0.9917	4.8435	0.7422	0.9992	−668.0193	0.8843	2.5584	0.9998
nd212	2.9872	0.4671	0.9908	4.9346	0.6676	0.9986	−1653.1276	0.8626	2.8212	0.9997
nd214	2.7912	0.4039	0.9927	4.6479	0.5760	0.9991	−459.2076	0.6760	2.5070	0.9996
nd216	2.8471	0.3799	0.9945	4.7611	0.5449	0.9992	−221.6246	0.5839	2.2105	0.9993
nd218	2.8170	0.3592	0.9964	4.7199	0.5158	0.9992	−69.3475	0.4898	1.8472	0.9993
nd220	2.9526	0.3543	0.9971	4.8959	0.5070	0.9993	−55.8408	0.4631	1.7294	0.9995
nd36	3.2610	0.8346	0.9983	4.8956	1.1040	0.9995	−56.6956	1.0147	1.7210	0.9998
nd37	3.2976	0.7188	0.9939	5.2674	1.0008	0.9986	−4728.9929	1.3741	2.9832	0.9995
nd38	3.4345	0.6553	0.9945	5.7263	0.9598	0.9996	−1164.6932	1.0922	2.4046	0.9998
nd39	3.3627	0.5931	0.9933	5.4880	0.8501	0.9992	−1172.5377	0.9910	2.3021	0.9996

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	b	R^2	p	q	R^2	b	k	m	R^2
nd310	3.2364	0.5382	0.9913	5.2547	0.7628	0.9975	−1776.2109	0.9513	2.7162	0.9981
nd312	2.9739	0.4547	0.9900	4.9616	0.6539	0.9970	−1620.4307	0.8399	2.7967	0.9980
nd314	2.9374	0.4115	0.9904	4.9480	0.5962	0.9972	−1165.7024	0.7429	2.6904	0.9980
nd316	2.9322	0.3925	0.9901	4.9295	0.5674	0.9966	−619.6839	0.6633	2.5000	0.9970
nd318	2.9688	0.3789	0.9924	5.0037	0.5500	0.9963	−176.7560	0.5599	2.0543	0.9963
nd320	3.3577	0.3903	0.9959	5.3986	0.5512	0.9996	−181.8209	0.5409	1.9384	0.9996
ne16	3.5951	0.8796	0.9980	5.2286	1.1348	0.9993	−129.1033	1.0958	1.8802	0.9994
ne17	3.5673	0.7899	0.9968	5.6093	1.0918	0.9994	−1563.3146	1.2949	2.5155	0.9996
ne18	3.4588	0.6788	0.9943	5.8469	1.0072	0.9996	−1163.5534	1.1343	2.3486	0.9998
ne19	3.2289	0.6087	0.9937	5.4399	0.8938	0.9993	−765.2545	1.0077	2.3727	0.9996
ne110	3.1615	0.5728	0.9934	5.3011	0.8361	0.9994	−604.9512	0.9347	2.3488	0.9997
ne112	3.0765	0.5242	0.9953	5.0937	0.7533	0.9997	−296.2362	0.8015	2.1901	0.9998
ne114	2.9912	0.4818	0.9958	4.9671	0.6910	0.9993	−170.9207	0.7038	2.0551	0.9993
ne116	3.0085	0.4464	0.9954	4.9764	0.6381	0.9978	−79.3019	0.5996	1.8113	0.9979
ne118	3.0689	0.4252	0.9981	5.0735	0.6090	0.9965	−9.8963	0.4727	1.2739	0.9984
ne120	3.3075	0.4323	0.9988	5.4251	0.6209	0.9984	−23.9807	0.5029	1.3964	0.9995
ne26	2.5417	0.7476	0.9866	4.5817	1.1378	0.9988	−667.3121	1.4009	2.6893	1.0000
ne27	3.0576	0.7992	0.9960	4.7955	1.0349	0.9995	−369.7292	1.1602	2.3922	0.9997
ne28	3.0061	0.6561	0.9945	4.7960	0.9049	0.9992	−1176.6075	1.1513	2.7585	0.9999
ne29	2.8247	0.5678	0.9952	4.6155	0.7966	0.9996	−215.9086	0.8652	2.2597	0.9997
ne210	2.7447	0.5179	0.9946	4.5534	0.7339	0.9995	−243.4453	0.8129	2.3273	0.9997
ne212	2.9513	0.4818	0.9965	4.8228	0.6794	0.9988	−63.2472	0.6343	1.7808	0.9990
ne214	2.6784	0.4163	0.9975	4.4220	0.5857	0.9990	−29.0509	0.5249	1.6528	0.9994
ne216	2.7044	0.3996	0.9979	4.4651	0.5624	0.9977	−14.7821	0.4713	1.4554	0.9987
ne218	2.6765	0.3720	0.9993	4.4385	0.5256	0.9968	−3.8869	0.4002	1.1937	0.9995
ne220	2.7993	0.3636	0.9995	4.6569	0.5187	0.9972	−3.9514	0.3892	1.1768	0.9996
ne36	3.7887	0.9939	0.9961	4.9078	1.1664	0.9993	−710.8341	1.3805	2.5927	0.9999
ne37	3.0211	0.7017	0.9925	4.6735	0.9410	0.9982	−3016.0138	1.3274	3.1614	0.9993
ne38	2.9484	0.6292	0.9924	4.7759	0.8779	0.9985	−2392.8213	1.2018	3.0122	0.9998
ne39	2.6867	0.5352	0.9890	4.5221	0.7660	0.9978	−1838.9408	1.0544	3.0640	0.9996

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	b	R^2	p	q	R^2	b	k	m	R^2
ne310	2.7391	0.5102	0.9901	4.6665	0.7405	0.9979	−637.4264	0.8967	2.6161	0.9986
ne312	2.6706	0.4602	0.9924	4.5420	0.6643	0.9982	−270.8847	0.7463	2.3623	0.9984
ne314	2.8138	0.4411	0.9937	4.6439	0.6241	0.9989	−176.4658	0.6600	2.1847	0.9990
ne316	3.1318	0.4431	0.9963	5.1240	0.6299	0.9982	−75.5664	0.5813	1.7545	0.9984
ne318	3.5432	0.4438	0.9975	5.7507	0.6354	0.9982	−62.5841	0.5459	1.5571	0.9987
ne320	4.0672	0.4714	0.9988	6.4679	0.6722	0.9979	−39.6737	0.5328	1.3256	0.9993
ne46	4.7981	1.2629	0.9961	5.0752	1.2442	0.9978	−3475.6763	1.6908	3.0766	1.0000
ne47	4.1998	1.0100	0.9978	5.7335	1.2409	0.9993	−4171.1009	1.5640	2.8705	0.9999
ne48	3.6748	0.8009	0.9963	5.7796	1.1107	0.9993	−9736.7861	1.5279	2.9786	1.0000
ne49	3.4333	0.7040	0.9939	5.7087	1.0240	0.9989	−6910.7405	1.3841	2.9043	0.9998
ne410	3.3629	0.6463	0.9939	5.7003	0.9589	0.9994	−1373.7364	1.1137	2.4542	0.9998
ne412	3.0274	0.5455	0.9945	5.0435	0.7857	0.9990	−308.2196	0.8435	2.2229	0.9991
ne414	3.1428	0.5091	0.9930	5.1341	0.7238	0.9991	−780.8607	0.8442	2.5066	0.9994
ne416	3.0694	0.4882	0.9940	5.0312	0.6940	0.9990	−345.7610	0.7546	2.2694	0.9992
ne418	3.0001	0.4584	0.9963	4.9300	0.6509	0.9982	−63.4162	0.6010	1.7550	0.9984
ne420	3.3630	0.4681	0.9966	5.5171	0.6735	0.9990	−127.4893	0.6303	1.8041	0.9991
ne56	2.3148	0.7631	0.9954	4.2330	1.1520	0.9999	−117.1861	1.2279	2.1781	1.0000
ne58	4.3247	0.8394	0.9969	7.5831	1.3236	0.9999	−1171.9478	1.2638	1.8871	1.0000
ne510	5.4268	0.7903	0.9978	8.8623	1.1818	0.9998	−16 473.0651	1.2618	2.1710	0.9999
ne512	7.1927	0.8466	0.9997	10.6789	1.1766	0.9998	−11 952.0309	1.0805	1.7504	0.9999
ne514	6.3188	0.6725	0.9986	9.9976	0.9915	0.9996	−3191.2896	0.8661	1.6165	1.0000
ne516	6.2579	0.6282	0.9967	9.4301	0.8811	0.9980	−1885.7387	0.7729	1.5898	0.9986
ne520	9.8083	0.7675	0.9983	14.9203	1.1123	0.9998	−995 269.9093	1.0493	1.8343	0.9999
qa16	1.5214	0.5142	0.9916	2.6036	0.6808	0.9820	1.3057	0.4395	0.5406	0.9935
qa17	1.8946	0.3948	0.9783	3.4380	0.5731	0.9927	−1170.4135	0.8823	3.5463	0.9965
qa18	2.4701	0.3745	0.9909	4.2270	0.5375	0.9978	−297.1132	0.6344	2.5302	0.9983
qa19	3.0626	0.3928	0.9841	5.0652	0.5637	0.9947	−16 769.0211	0.8844	3.5430	0.9978
qa110	3.1509	0.3601	0.9800	5.2583	0.5223	0.9928	−664 187.4677	1.0549	4.5890	0.9983
qa111	3.2960	0.3415	0.9807	5.4566	0.4947	0.9929	−358 607.2604	0.9336	4.2839	0.9979
qa112	3.9300	0.3641	0.9841	6.3235	0.5232	0.9949	−1 068 613.6930	0.9530	4.1380	0.9991

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	b	R^2	p	q	R^2	b	k	m	R^2
qa114	4.0340	0.3257	0.9744	6.4461	0.4663	0.9898	−283 079 555.2000	1.1000	5.6000	0.9985
qa116	4.2707	0.3056	0.9749	6.9085	0.4449	0.9894	−4 640 887 125.0000	1.1743	5.9660	0.9978
qa118	4.4214	0.2937	0.9845	7.0295	0.4220	0.9947	−5 183 251.6410	0.7830	4.1930	0.9989
qa120	4.0292	0.2591	0.9836	6.5243	0.3756	0.9949	−325 374.5935	0.6185	3.7044	0.9984
qa26	2.5278	0.5786	0.9856	4.1611	0.8052	0.9968	−3693.6832	1.2475	3.5330	0.9999
qa27	3.1224	0.4704	0.9845	4.9871	0.6552	0.9940	−127 336.8253	1.2201	4.2859	0.9988
qa28	4.2349	0.4856	0.9923	6.3882	0.6623	0.9976	−28 912.2955	0.9238	3.1437	0.9988
qa29	5.0548	0.4987	0.9891	7.6388	0.6926	0.9957	−276 539.4233	1.0037	3.2527	0.9974
qa210	4.8526	0.4304	0.9921	7.4405	0.6026	0.9981	−170 131.4815	0.8601	3.1900	0.9996
qa211	5.7373	0.4547	0.9950	8.4572	0.6214	0.9981	−167 673.7520	0.8048	2.8724	0.9985
qa212	5.4054	0.4175	0.9978	8.2150	0.5846	0.9994	−3897.4352	0.5870	2.0128	0.9994
qa214	5.8270	0.4004	0.9972	8.8689	0.5651	0.9997	−15 645.6765	0.5992	2.1786	0.9997
qa216	5.4822	0.3405	0.9977	8.4202	0.4822	0.9996	−4134.6107	0.4787	1.9783	0.9996
qa218	4.9689	0.2967	0.9949	7.7900	0.4254	0.9988	−9269.0261	0.4741	2.3275	0.9775
qa220	4.8289	0.2814	0.9953	7.5065	0.4007	0.9995	−9936.2347	0.4604	2.4282	0.9997
qa36	1.6451	0.4570	0.9698	3.0629	0.6618	0.9906	−2121.5622	1.1489	4.1963	0.9984
qa37	2.2907	0.3820	0.9859	4.0210	0.5547	0.9950	−578.4604	0.7247	2.8790	0.9962
qa38	2.7306	0.3593	0.9819	4.6223	0.5180	0.9939	−25 533.5438	0.8912	3.9489	0.9979
qa39	3.3766	0.3505	0.9788	5.4980	0.5020	0.9926	−110 319.5077	0.8635	3.9314	0.9975
qa310	3.7409	0.3470	0.9803	6.0832	0.5009	0.9923	−23 962 088.7400	1.1300	5.1300	0.9985
qa311	3.9420	0.3320	0.9766	6.2691	0.4725	0.9908	−364 122 004.3000	1.2000	5.8000	0.9989
qa312	3.7993	0.3068	0.9732	6.1598	0.4426	0.9888	−114 385 828.7000	1.1000	5.5000	0.9978
qa314	4.3350	0.3039	0.9808	6.8245	0.4321	0.9914	−21 905 475.0800	0.8900	4.7200	0.9995
qa316	4.4443	0.2787	0.9790	6.9679	0.3960	0.9921	−166 063 801.8000	0.9000	5.1000	0.9989
qa318	4.7644	0.2829	0.9788	7.3897	0.4000	0.9919	−766 617 736.6000	0.9000	5.3000	0.9990
qa320	4.5032	0.2579	0.9848	7.0173	0.3647	0.9954	−529 170.3531	0.5871	3.6529	0.9988
qb16	1.4132	0.5231	0.9906	2.5282	0.7075	0.9982	−82.9526	0.9051	2.9971	0.9997
qb17	1.6211	0.3860	0.9789	2.9741	0.5491	0.9943	−957.1767	0.8837	3.8852	0.9991
qb18	1.7622	0.3424	0.9802	3.1868	0.4886	0.9944	−854.3450	0.7507	3.6317	0.9980
qb19	1.9589	0.3263	0.9731	3.5222	0.4728	0.9903	−13 481.5598	0.9062	4.5793	0.9969

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	b	R^2	p	q	R^2	b	k	m	R^2
qb110	2.2170	0.3289	0.9807	3.8812	0.4744	0.9943	−5310.5478	0.7911	3.8693	0.9985
qb111	2.2283	0.2998	0.9728	3.9603	0.4397	0.9907	−43 325.4914	0.8726	4.6326	0.9981
qb112	2.4969	0.3025	0.9716	4.3745	0.4457	0.9883	−545 358.6401	1.0028	5.2045	0.9960
qb114	2.6867	0.2783	0.9750	4.6015	0.4047	0.9898	−1 482 273.5470	0.9390	5.3790	0.9971
qb116	3.0994	0.2765	0.9819	5.2179	0.4034	0.9936	−17 015.9930	0.6195	3.4690	0.9964
qb118	3.3087	0.2681	0.9865	5.5021	0.3899	0.9961	−4922.8369	0.5202	2.9293	0.9976
qb120	3.1010	0.2463	0.9859	5.2056	0.3589	0.9954	−1809.0996	0.4518	2.7364	0.9965
qb26	1.8615	0.6180	0.9902	3.3551	0.8874	0.9989	−92.6265	1.0254	2.4972	0.9994
qb27	2.5275	0.5374	0.9805	4.2101	0.7562	0.9949	−6934.3739	1.2315	3.7690	0.9998
qb28	2.7024	0.4698	0.9873	4.5625	0.6761	0.9979	−1608.1803	0.9127	2.9966	0.9996
qb29	3.4578	0.5005	0.9921	5.4116	0.6923	0.9984	−3301.2688	0.8992	2.8641	0.9995
qb210	3.1628	0.4178	0.9893	5.1383	0.5916	0.9976	−5735.6485	0.8362	3.1509	0.9994
qb211	3.3913	0.4116	0.9875	5.5039	0.5874	0.9971	−16 186.2023	0.8697	3.3021	0.9995
qb212	3.8615	0.4364	0.9924	5.9856	0.6050	0.9983	−10 368.0302	0.8133	2.9801	0.9994
qb214	3.9182	0.3924	0.9889	6.2025	0.5554	0.9973	−1694.0377	0.6428	2.2550	0.9965
qb216	3.6433	0.3331	0.9904	5.8548	0.4743	0.9980	−11 082.2210	0.6511	3.0420	0.9995
qb218	7.5078	0.5203	0.9992	11.3168	0.7389	0.9996	−11 409.1245	0.6514	1.6337	0.9999
qb220	7.0204	0.4503	0.9973	10.9597	0.6589	0.9989	−13 697.0265	0.5992	1.7335	0.9990
qb36	2.6753	0.6151	0.9769	4.2477	0.8342	0.9908	−2 812 505.3920	2.1390	5.9610	1.0000
qb37	3.1363	0.4858	0.9728	5.0938	0.6878	0.9893	−10 269 858.3300	1.6700	5.7000	0.9999
qb38	3.5953	0.4665	0.9810	5.6698	0.6523	0.9933	−2 943 063.5670	1.3670	4.8570	0.9996
qb39	3.7473	0.4383	0.9862	5.9277	0.6173	0.9962	−147 932.1558	1.0275	3.8075	0.9997
qb310	3.9932	0.4217	0.9882	6.2195	0.5885	0.9964	−426 565.0318	1.0187	3.9632	0.9995
qb311	4.0177	0.4003	0.9910	6.2419	0.5581	0.9978	−34 200.3906	0.8022	3.2319	0.9994
qb312	4.0930	0.3930	0.9914	6.3354	0.5472	0.9981	−28 195.4592	0.7678	3.1300	0.9996
qb314	4.2859	0.3775	0.9926	6.5466	0.5210	0.9978	−32 384.3987	0.7214	3.0909	0.9989
qb316	4.2041	0.3419	0.9967	6.5929	0.4831	0.9995	−1067.8258	0.4999	2.1039	0.9995
qb318	7.0760	0.4520	0.9986	10.4873	0.6293	0.9991	−3600.1638	0.5436	1.5233	0.9999
qb320	6.3399	0.3916	0.9953	9.5561	0.5506	0.9976	−3830.0420	0.5031	1.7097	0.9979
qc16	1.3272	0.6272	0.9951	2.2438	0.7994	0.9987	−77.5141	1.0513	3.2378	0.9998

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	b	R^2	p	q	R^2	b	k	m	R^2
qc17	1.2741	0.4354	0.9860	2.3280	0.5864	0.9959	-241.0095	0.8867	3.8211	0.9993
qc18	1.4122	0.3844	0.9779	2.6161	0.5355	0.9922	−1588.3843	0.9664	4.5454	0.9986
qc19	1.5506	0.3524	0.9821	2.8434	0.4957	0.9934	−573.8500	0.7699	3.7292	0.9966
qc110	1.7251	0.3322	0.9824	3.1159	0.4739	0.9957	−415.5854	0.6797	3.3349	0.9984
qc111	1.8493	0.3211	0.9795	3.3184	0.4594	0.9947	−2283.4903	0.7697	3.9712	0.9996
qc112	1.9162	0.3099	0.9794	3.4253	0.4444	0.9931	−2400.4918	0.7349	3.8930	0.9970
qc114	3.9874	0.4263	0.9930	6.4448	0.6150	0.9965	−674.4300	0.6189	2.0191	0.9965
qc116	3.9696	0.3751	0.9948	6.3071	0.5322	0.9943	−52.5325	0.4352	1.4051	0.9955
qc118	7.7919	0.5416	0.9971	11.6058	0.7625	0.9995	−305 893.3137	0.8123	2.1886	0.9996
qc120	6.2626	0.4162	0.9937	9.8775	0.6105	0.9972	−60 489.6810	0.6608	2.2253	0.9973
qc26	2.3364	0.6474	0.9884	4.1062	0.9499	0.9990	−399.5233	1.1719	2.7313	1.0000
qc27	2.8622	0.5630	0.9937	4.8361	0.8156	0.9991	−365.3722	0.9144	2.3492	0.9994
qc28	2.8610	0.4725	0.9897	4.6977	0.6672	0.9978	−3853.9991	0.9627	3.2406	0.9997
qc29	3.0575	0.4538	0.9920	4.9966	0.6438	0.9986	−2344.2828	0.8543	2.9115	0.9998
qc210	3.0609	0.4205	0.9957	4.9477	0.5903	0.9996	−301.2428	0.6391	2.2500	0.9996
qc211	3.0952	0.3981	0.9949	5.0406	0.5632	0.9992	−480.6945	0.6336	2.3683	0.9994
qc212	4.2096	0.5516	0.9994	6.6233	0.7821	0.9991	−112.6140	0.6642	1.5128	0.9997
qc214	4.7920	0.4566	0.9990	7.5416	0.6546	0.9987	−155.4718	0.5354	1.4294	0.9995
qc216	7.3138	0.5116	0.9993	11.0707	0.7278	0.9969	−4214.8801	0.6241	1.4229	0.9986
qc218	7.2014	0.4711	0.9972	10.7177	0.6586	0.9949	−387.6099	0.4995	1.1693	0.9972
qc220	7.0354	0.4331	0.9974	10.5271	0.6076	0.9934	133.0362	0.3887	0.7151	0.9979
qc36	2.1319	0.5887	0.9902	3.7859	0.8580	0.9991	−234.5555	1.0426	2.6702	0.9999
qc37	2.6392	0.5198	0.9940	4.4449	0.7430	0.9994	−277.1617	0.8471	2.4118	0.9997
qc38	2.8491	0.4687	0.9886	4.7302	0.6687	0.9973	−8109.8095	1.0302	3.4783	0.9997
qc39	3.1478	0.4447	0.9931	5.0688	0.6251	0.9988	−2003.6204	0.8092	2.8338	0.9998
qc310	3.5512	0.4139	0.9922	5.7495	0.5920	0.9984	−8525.8851	0.8062	2.9907	0.9996
qc311	3.2312	0.3887	0.9910	5.3044	0.5571	0.9981	−2715.0204	0.7206	2.8320	0.9992
qc312	5.8248	0.5754	0.9999	8.9365	0.8179	0.9969	−48.6963	0.5989	1.1063	0.9999
qc314	5.1888	0.4788	0.9995	8.0874	0.6850	0.9979	−83.2252	0.5245	1.2433	0.9998
qc316	7.2055	0.4942	0.9988	10.9086	0.7027	0.9948	37.1006	0.4886	0.9695	0.9988

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	*b*	R^2	*p*	*q*	R^2	*b*	*k*	*m*	R^2
qc318	7.2910	0.4707	0.9976	11.0738	0.6715	0.9965	−1046.9390	0.5216	1.2731	0.9979
qc320	6.4791	0.3987	0.9966	9.6956	0.5567	0.9961	−916.4148	0.4603	1.4018	0.9972
qd16	1.3648	1.2181	0.9999	1.6981	1.2967	0.9999	0.0157	1.2178	0.9960	0.9999
qd17	0.9974	0.7073	0.9973	1.5744	0.8230	0.9987	−142.5482	1.2468	4.8959	1.0000
qd18	1.2653	0.6137	0.9977	2.1410	0.7772	0.9998	−20.9572	0.8709	2.5092	1.0000
qd19	1.3395	0.5710	0.9988	2.3094	0.7428	0.9987	−3.8354	0.6678	1.5804	0.9993
qd110	1.5058	0.5128	0.9953	2.6477	0.6924	0.9965	−7.3179	0.6412	1.7192	0.9968
qd111	1.6208	0.4812	0.9930	2.9176	0.6736	0.9996	−45.2038	0.7546	2.4070	0.9999
qd112	2.1092	0.5210	0.9957	3.6598	0.7423	0.9993	−24.3063	0.7025	1.8278	0.9994
qd114	2.1787	0.4374	0.9973	3.8015	0.6275	0.9977	−10.2184	0.5316	1.5167	0.9984
qd116	2.7406	0.4124	0.9931	4.5682	0.5875	0.9996	−223.9514	0.6433	2.2968	0.9998
qd118	4.4869	0.4978	0.9990	6.7072	0.6762	0.9983	−438.7824	0.6451	1.8003	0.9989
qd120	4.4313	0.4445	0.9974	6.8524	0.6222	0.9985	−215.2514	0.5505	1.6057	0.9991
qd26	1.6765	0.5966	0.9921	2.9937	0.8321	0.9990	−94.1678	1.0139	2.7160	0.9999
qd27	1.9872	0.4786	0.9870	3.5054	0.6834	0.9981	−370.2006	0.9123	3.0175	0.9999
qd28	1.9881	0.4086	0.9818	3.5042	0.5829	0.9958	−1802.3534	0.9247	3.7266	0.9998
qd29	2.2844	0.4040	0.9882	3.9208	0.5756	0.9979	−686.7722	0.7763	3.0225	0.9995
qd210	3.6520	0.4959	0.9983	5.8063	0.6994	0.9990	−90.2248	0.6192	1.6322	0.9995
qd211	3.3714	0.4361	0.9964	5.4253	0.6160	0.9988	−141.6122	0.5881	1.8567	0.9989
qd212	5.3794	0.5533	0.9981	8.2830	0.7832	0.9968	−117.7977	0.6107	1.2633	0.9981
qd214	4.8500	0.4637	0.9983	7.6120	0.6632	0.9987	−335.0351	0.5727	1.5769	0.9991
qd216	9.1453	0.6189	0.9996	13.7934	0.8884	0.9986	−9825.0647	0.6898	1.3050	0.9998
qd218	8.0319	0.5169	0.9979	12.0589	0.7342	0.9985	−10 731.9659	0.6228	1.4920	0.9994
qd220	7.7458	0.4694	0.9993	11.7349	0.6713	0.9969	−720.3104	0.5006	1.1678	0.9995
qd36	3.2880	0.7767	0.9937	4.8241	1.0017	0.9984	−5906.3148	1.4682	3.3479	0.9998
qd37	3.4164	0.6032	0.9916	5.4912	0.8546	0.9982	−15 765.8636	1.2548	3.3666	0.9998
qd38	3.6067	0.5147	0.9941	5.6081	0.7934	0.9991	−4848.2980	1.0438	2.8909	1.0000
qd39	3.6674	0.5170	0.9937	5.8117	0.7269	0.9990	−6667.7704	0.9597	2.9131	1.0000
qd310	6.4631	0.6788	0.9984	10.1327	0.9937	0.9998	−5334.4136	0.8931	1.6868	1.0000
qd311	5.3101	0.5928	0.9994	8.3319	0.8546	0.9987	−210.9553	0.6813	1.3718	0.9998

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	*b*	R^2	*p*	*q*	R^2	*b*	*k*	*m*	R^2
qd312	6.2467	0.6193		9.4948	0.8752	0.9935	47.9249	0.5889	0.8635	0.9992
qd314	5.5700	0.5023	0.9979	8.7543	0.7278	0.9983	−618.6487	0.6108	1.5071	0.9990
qd316	11.1631	0.7429	0.9993	17.2631	1.1030	0.9987	−129 536.1792	0.8465	1.3145	0.9993
qd318	8.8193	0.5483	0.9975	13.1707	0.7776	0.9994	−410 469.2954	0.7669	1.9581	0.9994
qd320	9.6773	0.5745	0.9970	13.8719	0.7870	0.9955	−32 414.8541	0.6529	1.4255	0.9967
qe16	1.3813	0.9780	0.9992	1.9150	1.0977	0.9995	−11 156.8404	2.3339	9.2906	1.0000
qe17	1.3222	0.6825	0.9948	2.1650	0.8480	0.9979	−282.0246	1.3206	4.2386	1.0000
qe18	1.5129	0.6007	0.9942	2.6480	0.8074	0.9992	−63.4039	0.9815	2.7521	1.0000
qe19	2.7255	0.6820	0.9989	4.4438	0.9497	0.9971	−4.7628	0.7353	1.2213	0.9992
qe110	2.9795	0.6667	0.9990	4.8739	0.9407	0.9992	−23.1265	0.7890	1.4980	0.9997
qe111	3.0722	0.6334	0.9989	5.1201	0.9145	0.9989	−27.3906	0.7612	1.4944	0.9996
qe112	3.4573	0.6084	0.9974	5.5803	0.8658	0.9990	−76.9739	0.7717	1.6354	0.9995
qe114	3.6350	0.5629	0.9973	5.7727	0.7929	0.9998	−177.9739	0.7490	1.8289	0.9999
qe116	5.5907	0.6423	0.9996	8.6489	0.9168	0.9989	−288.7664	0.7340	1.3823	0.9999
qe118	5.0074	0.5395	0.9989	7.7577	0.7649	0.9953	4.8168	0.5325	0.9649	0.9989
qe120	4.7949	0.4830	0.9985	7.3603	0.6760	0.9950	−22.4985	0.5082	1.1335	0.9986
qe26	1.3860	0.7880	0.9969	2.1425	0.9462	0.9985	−999.3622	1.6684	5.3826	1.0000
qe27	1.4704	0.5637	0.9863	2.6271	0.7662	0.9957	−401.4163	1.1786	3.7992	1.0000
qe28	1.5501	0.4810	0.9854	2.8202	0.6721	0.9965	−434.9617	1.0083	3.6572	0.9997
qe29	3.1658	0.6203	0.9973	5.3419	0.9100	0.9997	−120.6345	0.8597	1.8397	0.9997
qe210	3.2446	0.5963	0.9990	5.2936	0.8219	0.9981	−18.0480	0.6594	1.3524	0.9993
qe211	4.6456	0.6622	0.9994	7.4806	0.9683	0.9992	−169.8637	0.7959	1.4684	0.9999
qe212	5.7636	0.7036	0.9999	8.7420	0.9869	0.9975	−34.2495	0.7224	1.0877	0.9999
qe214	5.2710	0.5609	0.9985	8.1415	0.7967	0.9991	−452.5705	0.6838	1.5231	0.9999
qe216	5.0650	0.4688	0.9966	7.8956	0.6693	0.9994	−1386.8069	0.6347	1.8403	0.9995
qe218	7.9551	0.5799	0.9993	11.8741	0.8182	0.9985	−6744.1556	0.6817	1.4440	0.9994
qe220	7.2420	0.4847	0.9972	10.8838	0.6845	0.9997	−195 451.3891	0.7437	2.2559	0.9998
qe36	7.8901	0.7154	0.9917	3.3259	1.0017	0.9982	−452.9296	1.4157	3.1936	1.0000
qe37	2.2722	0.5959	0.9935	3.9034	0.8503	0.9996	−73.2917	0.8892	2.1476	0.9997
qe38	2.1921	0.5108	0.9903	3.7765	0.7250	0.9987	−320.5262	0.9165	2.7889	0.9996

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	*b*	R^2	*p*	*q*	R^2	*b*	*k*	*m*	R^2
qe39	4.1894	0.6625	0.9971	6.5799	0.9332	0.9964	−42.6653	0.7399	1.3244	0.9977
qe310	4.8631	0.6200	0.9974	7.4963	0.8719	0.9965	−125.6147	0.7121	1.3730	0.9982
qe311	5.2967	0.6465	0.9988	8.0556	0.9037	0.9990	−324.1167	0.7595	1.4801	0.9997
qe312	7.6688	0.7966	0.9997	11.6239	1.1416	0.9937	117.1985	0.7739	0.9290	0.9997
qe314	6.8489	0.6395	0.9994	10.4886	0.9164	0.9979	54.6479	0.6244	0.9290	0.9993
qe316	8.8783	0.6344	0.9951	13.1501	0.8943	0.9996	−896 721.0261	0.9225	2.0977	0.9996
qe318	8.3870	0.5672	0.9993	12.5718	0.8058	0.9983	−6528.0155	0.6460	1.3698	0.9997
qe320	7.1156	0.4482	0.9971	10.9341	0.6460	0.9989	−9534.3237	0.5755	1.6627	0.9993
sa19	4.2884	0.5789	0.9939	6.8695	0.8358	0.9994	−10 169.5713	1.0210	2.6461	0.9999
sa110	4.1016	0.5025	0.9917	6.4646	0.7113	0.9987	−18 071.8670	0.9496	2.9466	0.9999
sa111	4.2836	0.4848	0.9934	6.6254	0.6766	0.9990	−14 493.6310	0.8715	2.8351	0.9999
sa112	4.7713	0.4684	0.9922	7.4860	0.6685	0.9974	−66 777.1766	0.8896	2.9129	0.9983
sa114	4.6000	0.4451	0.9942	7.3046	0.6405	0.9978	−1360.7285	0.6357	1.9776	0.9978
sa116	4.1332	0.3750	0.9975	6.6021	0.5376	0.9982	−130.9932	0.4619	1.5598	0.9988
sa118	4.1745	0.3498	0.9941	6.6248	0.4990	0.9984	−822.4003	0.5029	2.0243	0.9984
sa120	4.2907	0.3382	0.9934	6.8381	0.4857	0.9989	−1878.4122	0.5162	2.1900	0.9990
sa29	2.8286	0.4413	0.9973	4.6924	0.6292	0.9986	−27.7402	0.5465	1.5769	0.9991
sa210	2.7607	0.3785	0.9952	4.6558	0.5459	0.9971	−36.7700	0.4882	1.6713	0.9974
sa211	4.3949	0.4621	0.9992	6.7241	0.6413	0.9960	−10.6715	0.4803	1.1040	0.9992
sa212	4.8661	0.4846	0.9986	7.5905	0.6914	0.9975	−83.3527	0.5437	1.2953	0.9993
sa214	4.5626	0.4074	0.9964	7.2459	0.5872	0.9972	−211.0160	0.5011	1.5424	0.9979
sa216	5.7801	0.4472	0.9996	8.9236	0.6388	0.9965	−34.2497	0.4617	1.0833	0.9996
sa218	5.5644	0.4070	0.9985	8.6238	0.5816	0.9972	−131.0673	0.4473	1.2476	0.9988
sa220	5.2028	0.3699	0.9963	8.1165	0.5288	0.9958	−182.4457	0.4248	1.3660	0.9969
sa310	3.0863	0.3890	0.9974	5.0075	0.5494	0.9992	−79.4970	0.5146	1.8035	0.9993
sa311	3.9082	0.4195	0.9996	6.2378	0.5983	0.9975	−25.8961	0.4659	1.2833	0.9994
sa312	3.6847	0.3882	0.9983	5.8724	0.5489	0.9957	−7.2460	0.4081	1.1384	0.9983
sa314	3.8244	0.3579	0.9948	6.0193	0.5020	0.9942	−49.5876	0.4185	1.4314	0.9956
sa316	4.0377	0.3394	0.9952	6.4622	0.4864	0.9950	−67.1600	0.4005	1.4326	0.9962
sa318	3.7703	0.3055	0.9926	6.0492	0.4355	0.9914	−30.7118	0.3477	1.3385	0.9933

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	*b*	R^2	*p*	*q*	R^2	*b*	*k*	*m*	R^2
sa320	3.4992	0.2654	0.9902	5.7360	0.3832	0.9949	−306.2893	0.3828	1.9966	0.9949
sa410	3.9021	0.4467	0.9976	6.2855	0.6421	0.9993	−195.6519	0.5848	1.7306	0.9994
sa411	6.6542	0.5810	0.9994	10.2198	0.8346	0.9969	−97.0998	0.6029	1.0919	0.9994
sa412	6.0818	0.5272	0.9985	9.2565	0.7453	0.9949	−1.1585	0.5279	1.0026	0.9985
sa414	6.4240	0.4773	0.9837	9.7467	0.6749	0.9961	−8 484 769.9970	0.9870	3.4830	0.9989
sa416	6.7201	0.4565	0.9970	10.2357	0.6504	0.9984	−3794.3687	0.5687	1.5980	0.9991
sa418	6.6630	0.4237	0.9898	10.1863	0.6051	0.9985	−1 301 946.0100	0.7750	2.8200	0.9997
sa420	6.7210	0.4114	0.9923	10.3624	0.5924	0.9977	−85 802.5380	0.6328	2.2025	0.9977
sb19	2.4441	0.5743	0.9961	4.1140	0.8117	0.9991	−36.0399	0.7649	1.8181	0.9992
sb110	2.8729	0.5566	0.9991	4.8100	0.8011	0.9986	−14.5802	0.6477	1.3987	0.9997
sb111	3.0433	0.5008	0.9971	4.9662	0.7090	0.9991	−51.3828	0.6399	1.6791	0.9996
sb112	3.2541	0.4888	0.9975	5.2330	0.6889	0.9989	−56.6789	0.6125	1.6419	0.9994
sb114	3.0954	0.4153	0.9984	5.0516	0.5890	0.9988	−29.7775	0.5007	1.5143	0.9996
sb116	3.3236	0.4041	0.9957	5.4519	0.5804	0.9989	−170.2294	0.5624	1.9061	0.9989
sb118	3.1424	0.3636	0.9955	5.2031	0.5237	0.9986	−87.6543	0.4864	1.7798	0.9987
sb120	3.2165	0.3403	0.9944	5.1930	0.4799	0.9992	−253.1741	0.4965	2.1117	0.9992
sb122	3.0067	0.3165	0.9948	4.8869	0.4454	0.9992	−134.9760	0.4463	2.0061	0.9992
sb125	2.9217	0.2888	0.9957	4.7678	0.4063	0.9972	−40.1968	0.3647	1.6580	0.9977
sb29	3.0583	0.6629	0.9977	4.9833	0.9351	0.9996	−88.8055	0.8871	1.8484	0.9997
sb210	3.0892	0.5765	0.9968	5.1413	0.8328	0.9997	−116.9865	0.8010	1.8829	0.9997
sb211	3.3424	0.5479	0.9927	5.4020	0.7763	0.9979	−352.9108	0.8125	2.1467	0.9979
sb212	3.4075	0.5099	0.9949	5.4407	0.7165	0.9989	−225.9446	0.7150	1.9937	0.9989
sb214	3.8100	0.4914	0.9949	6.0902	0.6988	0.9990	−710.9316	0.7304	2.1384	0.9990
sb216	4.9111	0.5167	0.9968	7.7432	0.7430	0.9985	−660.9454	0.6716	1.7004	0.9988
sb218	4.1811	0.4336	0.9958	6.7000	0.6238	0.9975	−241.0526	0.5606	1.6850	0.9978
sb220	3.8677	0.3839	0.9955	6.2593	0.5535	0.9980	−220.1221	0.5112	1.7639	0.9982
sb222	3.6481	0.3562	0.9972	5.8874	0.5089	0.9971	−46.4604	0.4228	1.4554	0.9982
sb225	3.4849	0.3188	0.9959	5.6841	0.4577	0.9973	−75.2531	0.4021	1.6173	0.9978
sb39	3.1488	0.6750	0.9981	5.2231	0.9707	0.9992	−67.8174	0.8742	1.7117	0.9994
sb310	3.9040	0.6790	0.9966	6.2258	0.8350	0.9999	−601.5958	0.9857	2.0500	0.9999

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	b	R^2	p	q	R^2	b	k	m	R^2
sb311	3.8683	0.5929	0.9977	6.1093	0.8010	0.9997	−498.9324	0.8433	2.0287	0.9997
sb312	3.9261	0.5559	0.9957	6.3403	0.9238	0.9994	−864.5824	0.8329	2.1169	0.9995
sb314	5.5878	0.6368	0.9975	8.8046	0.7930	0.9991	−2579.2995	0.8586	1.7983	0.9991
sb316	5.4665	0.5487	0.9955	8.5562	0.7930	0.9941	−90.5625	0.5971	1.2077	0.9960
sb318	5.7310	0.5224	0.9969	8.9247	0.7517	0.9994	−3688.4862	0.7125	1.8440	0.9994
sb320	4.7669	0.4308	0.9950	7.4778	0.6145	0.9976	−955.5838	0.5843	1.8444	0.9976
sb322	4.8062	0.4144	0.9931	7.5648	0.5936	0.9981	−5881.1954	0.6498	2.2852	0.9983
sb325	4.4253	0.3613	0.9982	6.9302	0.5121	0.9988	−177.7439	0.4418	1.5574	0.9996
sb327	4.3320	0.3516	0.9974	6.8240	0.4999	0.9989	−252.7251	0.4472	1.6652	0.9993
sb49	3.2139	0.6432	0.9931	5.3883	0.9371	0.9989	−2101.0720	1.1754	2.6968	0.9997
sb410	3.9161	0.6432	0.9951	6.0000	0.8842	0.9995	−2772.5615	1.0579	2.5703	0.9998
sb411	4.2968	0.6193	0.9946	6.7310	0.8743	0.9992	−13 887.9865	1.1141	2.7607	1.0000
sb412	4.0151	0.5393	0.9947	6.4802	0.7795	0.9993	−4542.9796	0.9275	2.5400	0.9998
sb414	6.7096	0.7024	0.9984	10.3544	1.0150	0.9994	−6712.6899	0.9154	1.6856	0.9998
sb416	6.9217	0.6267	0.9939	10.6306	0.9008	0.9997	−143 692.8190	0.9754	2.2643	0.9999
sb418	6.3512	0.5396	0.9971	9.5364	0.7546	0.9949	−299.8998	0.5915	1.2438	0.9974
sb420	5.5508	0.4448	0.9881	8.5777	0.6324	0.9907	−7527.5093	0.6491	2.0825	0.9907
sb422	5.3865	0.4095	0.9914	8.3078	0.5802	0.9921	−581.5483	0.5013	1.5536	0.9928
sb425	5.2721	0.3685	0.9900	8.2569	0.5288	0.9923	−1740.0478	0.4971	1.8149	0.9924
sb427	4.8395	0.3394	0.9921	7.6073	0.4856	0.9949	−925.9575	0.4559	1.8074	0.9950
sc19	2.7001	0.6110	0.9955	4.4353	0.8541	0.9990	−143.0410	0.9057	2.1802	0.9990
sc110	3.2456	0.5988	0.9951	5.3277	0.8586	0.9991	−312.9069	0.8951	2.1325	0.9991
sc111	3.4691	0.5640	0.9955	5.5386	0.7939	0.9995	−770.3175	0.8854	2.3396	0.9997
sc112	3.8257	0.5111	0.9935	6.1610	0.7328	0.9991	−2601.8485	0.8567	2.4939	0.9995
sc114	5.2779	0.6315	0.9988	8.0912	0.8886	0.9991	−450.4448	0.7612	1.5508	0.9994
sc116	5.8652	0.6216	0.9992	9.2174	0.9060	0.9983	−349.2312	0.7134	1.3357	0.9996
sc118	5.5256	0.5193	0.9993	8.5407	0.7827	0.9975	−78.7656	0.5893	1.1870	0.9993
sc120	5.4556	0.5107	0.9990	8.4022	0.7249	0.9992	−564.2644	0.6186	1.5417	0.9998
sc122	4.7992	0.4346	0.9973	7.5314	0.6220	0.9996	−828.1025	0.5811	1.8022	0.9997
sc125	4.3055	0.3712	0.9963	6.8589	0.5332	0.9996	−731.4680	0.5209	1.9311	0.9996

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	*b*	R^2	*p*	*q*	R^2	*b*	*k*	*m*	R^2
sc127	4.3645	0.3644	0.9965	6.9569	0.5247	0.9995	−834.7158	0.5142	1.9409	0.9995
sc29	2.7877	0.6141	0.9955	4.6301	0.8707	0.9984	−88.0685	0.8563	1.9511	0.9984
sc210	3.3233	0.6038	0.9917	5.6311	0.8957	0.9987	−1536.1363	1.0572	2.5220	0.9993
sc211	3.5148	0.5606	0.9941	5.6097	0.7890	0.9987	−590.1822	0.8501	2.2374	0.9987
sc212	3.7318	0.5141	0.9862	6.1568	0.7521	0.9963	−26 515.4417	1.0715	3.1755	0.9985
sc214	5.3286	0.6054	0.9979	8.3166	0.8675	0.9993	−1145.4244	0.7846	1.7145	0.9995
sc216	5.1978	0.5167	0.9982	7.9597	0.7257	0.9939	−9.9934	0.5264	1.0486	0.9982
sc218	5.4512	0.4886	0.9995	8.4015	0.6942	0.9964	−39.0793	0.5108	1.1217	0.9995
sc220	4.9984	0.4216	0.9987	7.7680	0.5997	0.9944	−0.4198	0.4220	1.0028	0.9987
sc222	4.6530	0.3762	0.9976	7.2931	0.5358	0.9954	−45.4199	0.4119	1.2398	0.9979
sc225	4.2470	0.3344	0.9990	6.7396	0.4782	0.9971	−32.1682	0.3686	1.2542	0.9994
sc227	3.8761	0.3025	0.9991	6.1581	0.4290	0.9946	−0.7848	0.3043	1.0157	0.9991
sc39	2.3702	0.7164	0.9992	4.2038	1.0646	0.9984	−7.1099	0.8373	1.3514	0.9999
sc310	2.6625	0.4895	0.9972	4.5469	0.7118	0.9990	−31.6848	0.6315	1.6611	0.9993
sc311	3.0716	0.4805	0.9976	5.0659	0.6880	0.9996	−64.5859	0.6270	1.7296	0.9998
sc312	3.0206	0.4305	0.9964	4.9952	0.6165	0.9987	−62.3599	0.5642	1.7346	0.9989
sc314	3.2786	0.4052	0.9974	5.3822	0.5817	0.9986	−65.8818	0.5167	1.6557	0.9990
sc316	3.6923	0.3890	0.9930	5.9162	0.5532	0.9982	−449.7423	0.5633	2.0575	0.9982
sc318	3.7401	0.3668	0.9934	5.9826	0.5212	0.9989	−771.8023	0.5546	2.1982	0.9989
sc320	3.1944	0.3091	0.9902	5.2040	0.4393	0.9969	−347.3904	0.4686	2.2112	0.9969
sc322	3.1904	0.2885	0.9900	5.1985	0.4101	0.9973	−462.4883	0.4504	2.3086	0.9975
sc325	2.9569	0.2499	0.9928	4.8957	0.3571	0.9964	−77.8934	0.3378	1.8277	0.9965
sc49	3.0376	0.6798	0.9979	4.9457	0.9562	0.9989	−42.9304	0.8459	1.6566	0.9992
sc410	3.1006	0.5793	0.9972	5.2152	0.8461	0.9996	−87.5340	0.7838	1.7785	0.9998
sc411	3.6645	0.5953	0.9975	5.8204	0.8399	0,9996	−166.2484	0.7849	1.7983	0.9997
sc412	3.4879	0.5243	0.9954	5.6572	0.7485	0.9984	−208.6418	0.7257	1.9074	0.9984
sc414	3.1637	0.4484	0.9927	5.2090	0.6420	0.9982	−457.1378	0.7043	2.2948	0.9984
sc416	3.2815	0.4025	0.9949	5.3552	0.5741	0.9978	−128.2616	0.5461	1.8487	0.9979
sc418	2.9580	0.3551	0.9936	4.9238	0.5094	0.9974	−109.5908	0.4975	1.9274	0.9974
sc420	2.7703	0.3111	0.9903	4.6567	0.4469	0.9958	−125.1302	0.4552	2.0578	0.9958

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	*b*	R^2	*p*	*q*	R^2	*b*	*k*	*m*	R^2
sc422	0.6046	0.2810	0.9943	4.3772	0.3998	0.9965	−32.7879	0.3637	1.7075	0.9969
sc425	2.4773	0.2552	0.9956	4.1965	0.3636	0.9961	−13.7520	0.3080	1.5012	0.9972
sc427	2.8642	0.2702	0.9915	4.6939	0.3803	0.9899	−8.9054	0.3021	1.2998	0.9920
sd19	2.4464	0.4313	0.9914	4.2652	0.6289	0.9968	−124.9032	0.6705	2.1952	0.9968
sd110	2.6037	0.4048	0.9897	4.4824	0.5887	0.9968	−648.6942	0.7330	2.6897	0.9975
sd111	5.0161	0.5752	0.9971	7.7871	0.8164	0.9997	−1629.1338	0.7907	1.9059	0.9997
sd112	4.6395	0.5113	0.9973	7.3891	0.7390	0.9991	−507.5685	0.6701	1.7183	0.9993
sd114	4.7718	0.4652	0.9944	7.4699	0.6640	0.9997	−2780.4775	0.6896	2.1203	0.9998
sd116	5.1562	0.4383	0.9977	7.7899	0.6079	0.9979	−325.8240	0.5231	1.5054	0.9990
sd118	5.0649	0.4140	0.9972	7.7654	0.5818	0.9990	−614.9212	0.5239	1.6637	0.9995
sd120	4.4238	0.3442	0.9962	6.8323	0.4811	0.9965	−151.3366	0.4147	1.5256	0.9975
sd122	3.8213	0.2877	0.9947	5.9593	0.4004	0.9927	−24.5510	0.3199	1.2927	0.9951
sd125	3.3985	0.2294	0.9859	5.5218	0.3278	0.9918	−475.5791	0.3489	2.2038	0.9919
sd127	3.5987	0.2343	0.9871	5.8495	0.3370	0.9901	−153.8097	0.3121	1.7663	0.9903
sd29	2.2344	0.4598	0.9977	3.8781	0.6583	0.9952	−1.9936	0.4902	1.1657	0.9978
sd210	2.3750	0.4202	0.9978	3.8700	0.5742	0.9963	−5.6033	0.4693	1.3245	0.9981
sd211	4.3339	0.5098	0.9988	6.8320	0.7254	0.9977	−57.9227	0.5785	1.3420	0.9994
sd212	4.2079	0.4733	0.9992	6.6573	0.6746	0.9984	−58.2250	0.5427	1.3708	0.9999
sd214	5.0647	0.4537	0.9979	7.9088	0.6486	0.9983	−335.9927	0.5502	1.5180	0.9992
sd216	6.0737	0.4719	0.9985	9.2841	0.6703	0.9923	41.5397	0.4477	0.8579	0.9987
sd218	5.0787	0.3778	0.9959	7.8880	0.5366	0.9949	−150.4504	0.4322	1.3578	0.9965
sd220	5.3037	0.3761	0.9979	8.2760	0.5397	0.9982	−376.2448	0.4511	1.4783	0.9993
sd222	4.8741	0.3298	0.9971	7.4281	0.4593	0.9987	−420.5611	0.4117	1.6404	0.9993
sd225	4.3296	0.2749	0.9929	6.7365	0.3863	0.9971	−687.7861	0.3797	1.9425	0.9971
sd227	4.1458	0.2628	0.9882	6.4317	0.3665	0.9912	−424.9996	0.3546	1.8895	0.9913
sd39	2.9383	0.5419	0.9980	4.7587	0.7580	0.9979	−21.9641	0.6466	1.4845	0.9991
sd310	2.9694	0.4894	0.9964	4.8590	0.6922	0.9995	−86.7399	0.6647	1.8701	0.9996
sd311	3.0348	0.4534	0.9954	4.9306	0.6396	0.9993	−113.3612	0.6265	1.9346	0.9994
sd312	2.8258	0.4088	0.9960	4.6609	0.5787	0.9986	−52.0047	0.5375	1.7681	0.9989
sd314	2.8814	0.3906	0.9970	4.6781	0.5462	0.9951	−8.7482	0.4341	1.2966	0.9974

续表

样地	Gompertz			Logistic			Richards			
	a	*b*	R^2	*p*	*q*	R^2	*b*	*k*	*m*	R^2
sd316	2.5725	0.3211	0.9949	4.2510	0.4487	0.9928	−5.2233	0.3530	1.2624	0.9952
sd318	2.7103	0.3022	0.9942	4.5181	0.4288	0.9933	−10.4534	0.3466	1.3689	0.9949
sd320	3.0706	0.3000	0.9944	5.0768	0.4297	0.9962	−54.6096	0.3854	1.6763	0.9966
sd322	2.7077	0.2528	0.9912	4.5875	0.3639	0.9937	−52.5086	0.3402	1.7984	0.9939
sd325	2.6412	0.2313	0.9924	4.3678	0.3246	0.9915	−10.0634	0.2657	1.3804	0.9931
sd327	3.0497	0.2348	0.9911	5.0544	0.3362	0.9941	−103.3134	0.3222	1.8699	0.9941
sd49	2.9095	0.5524	0.9970	4.9205	0.8036	0.9993	−61.9646	0.7390	1.7574	0.9994
sd410	2.9014	0.4803	0.9936	4.8676	0.6925	0.9985	−274.1687	0.7497	2.2425	0.9987
sd411	4.5151	0.5546	0.9966	7.0414	0.7832	0.9978	−262.1589	0.6927	1.6238	0.9983
sd412	4.5113	0.5350	0.9941	7.1180	0.7632	0.9963	−647.5752	0.7223	1.8359	0.9964
sd414	4.6426	0.5021	0.9943	7.4342	0.7298	0.9989	−3259.7274	0.7711	2.1640	0.9990
sd416	5.8743	0.5352	0.9992	9.0175	0.7615	0.9989	−561.8427	0.6268	1.4392	0.9990
sd418	5.3541	0.4809	0.9939	8.5181	0.7034	0.9977	−4664.9861	0.6995	1.9843	0.9977
sd420	5.0065	0.4383	0.9952	7.9079	0.6331	0.9992	−2954.1036	0.6374	2.0201	0.9992
sd422	4.9476	0.4181	0.9960	7.8602	0.6083	0.9989	−1212.8800	0.5716	1.8210	0.9989
sd425	4.4976	0.3675	0.9944	7.1618	0.5303	0.9990	−1769.7346	0.5450	2.0817	0.9991
sd427	5.0241	0.3951	0.9971	7.9560	0.5733	0.9987	−526.8327	0.4999	1.6155	0.9990

表 II-2　Weibull、Korf 和 Mitscherlich 理论生长方程模拟林分直径分布的参数表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	*c*	R^2	*b*	*c*	R^2	*l*	*m*	R^2
na16	9.3231	7.0709	0.9997	62 864 265.1500	8.5100	0.9973	2.6502	0.2124	0.8364
na17	11.1759	6.7829	0.9999	547 938 932.2000	8.8000	0.9948	2.1876	0.1557	0.8022
na18	12.3629	7.2152	0.9985	92 259 804.7800	7.6800	0.9960	3.3948	0.1799	0.8470
na19	13.2791	7.3912	0.9990	1 321 038 423.0000	8.0000	0.9946	2.9110	0.1528	0.8115
na10	14.0635	7.9646	0.9975	4 797 024 888.0000	9.0000	0.9981	2.7381	0.1392	0.8018
na112	15.2684	7.5896	0.9928	2 101 182 571.0000	8.0000	0.9978	2.3749	0.1148	0.7648
na114	16.7461	7.3167	0.9969	3 773 927 263.0000	8.0000	0.9960	2.1975	0.0998	0.7620
na116	17.1514	7.1631	0.9951	2 109 800 058.0000	8.0000	0.9973	2.2142	0.0995	0.7830

续表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	*c*	R^2	*b*	*c*	R^2	*l*	*m*	R^2
na118	17.6706	6.4617	0.9937	382 412 853.3000	7.2000	0.9980	2.2085	0.0979	0.8052
na120	17.7735	6.8836	0.9963	761 592 087.6000	7.4000	0.9982	2.2008	0.0967	0.7960
na26	7.5035	5.0173	0.9989	33 449.5072	5.6803	0.9900	3.6836	0.3175	0.9158
na27	8.9479	5.8999	0.9998	20 024 147.4500	8.1400	0.9946	2.6844	0.2212	0.8462
na28	10.2133	6.0136	0.9990	673 353.3468	6.1927	0.9919	5.2955	0.2682	0.9138
na29	11.3341	6.5945	0.9999	266 417 370.7000	8.4000	0.9926	3.9835	0.2138	0.8711
na210	12.0606	6.3653	0.9988	10 757 562.2700	6.9000	0.9838	9.3437	0.2777	0.9292
na212	13.2201	7.2349	0.9990	144 050 380.8000	7.6000	0.9900	6.2416	0.2177	0.8916
na214	14.2358	7.4538	0.9983	454 671 304.2000	7.9000	0.9937	5.0022	0.1851	0.8691
na216	15.1664	7.1177	0.9971	251 574 164.2000	7.5000	0.9947	3.9769	0.1555	0.8455
na218	16.1750	7.0461	0.9966	452 148 877.0000	7.5000	0.9962	3.5394	0.1381	0.8424
na220	16.5091	6.4897	0.9970	120 784 071.3000	7.0000	0.9945	3.3889	0.1330	0.8445
na36	9.4548	5.0728	0.9972	229 015.8774	5.9299	0.9844	1.5099	0.1351	0.7613
na37	11.2180	5.5133	0.9998	423 355.7949	5.7551	0.9874	1.5130	0.1180	0.7722
na38	12.6520	5.6632	0.9961	1 092 971.1780	5.8620	0.9807	1.9951	0.1306	0.8107
na39	13.7521	6.3651	0.9989	18 456 264.1600	6.7500	0.9858	1.8407	0.1088	0.7609
na310	14.4356	6.1641	0.9977	12 358 345.8200	6.4800	0.9873	1.8379	0.1053	0.7785
na312	15.7625	6.9261	0.9998	294 058 959.1000	7.4000	0.9925	1.7707	0.0929	0.7569
na314	16.9335	7.0716	0.9980	517 463 338.3000	7.4000	0.9886	1.7295	0.0849	0.7539
na316	17.6525	7.3939	0.9986	1 292 091 095.0000	8.0000	0.9882	5.4047	0.1546	0.8851
na318	18.2245	7.0413	0.9974	757 020 353.4000	7.4000	0.9870	5.0047	0.1459	0.8895
na320	18.4057	6.7457	0.9970	184 111 538.5000	6.9000	0.9842	10.1156	0.1860	0.9360
nb16	7.7988	5.0338	0.9983	39 918.9170	5.6529	0.9899	1.6474	0.1918	0.8241
nb17	9.0180	5.5579	0.9972	46 580 466.1700	8.4900	0.9904	2.6915	0.2271	0.8701
nb18	10.0979	5.0926	0.9990	285 170.9569	5.8577	0.9872	2.3681	0.1889	0.8685
nb19	10.9028	5.5034	0.9978	393 153.1912	5.7900	0.9827	2.2469	0.1698	0.8572
nb110	11.3647	5.4411	0.9990	931 901.0004	6.0427	0.9869	2.1553	0.1573	0.8490
nb112	12.3740	5.3593	0.9994	2 799 530.5730	6.2880	0.9879	2.0105	0.1359	0.8290
nb114	13.4679	4.9851	0.9994	588 995.7515	5.4791	0.9851	1.9228	0.1216	0.8378
nb116	13.6398	4.6248	0.9994	250 636.7467	5.1273	0.9853	1.9390	0.1231	0.8625

续表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	*c*	R^2	*b*	*c*	R^2	*l*	*m*	R^2
nb118	14.2494	4.2490	0.9993	130 528.9237	4.7972	0.9847	2.6030	0.1414	0.9007
nb120	14.2710	4.0725	0.9986	92 092.2260	4.6630	0.9830	2.5689	0.1406	0.9047
nb26	6.2070	3.7052	0.9993	389.3176	3.8107	0.9861	1.7744	0.2615	0.8913
nb27	7.1788	4.6229	0.9998	59 742.2310	6.1044	0.9962	1.7270	0.2184	0.8573
nb28	7.9919	4.9335	0.9989	24 821.1658	5.3501	0.9944	3.2635	0.2844	0.9201
nb29	8.8445	5.0438	0.9996	50 099.7899	5.4019	0.9890	2.7810	0.2356	0.8912
nb210	9.5115	5.1008	0.9998	743 643.3190	6.4423	0.9913	2.5080	0.2051	0.8717
nb212	10.6025	5.0301	0.9999	169 032.9900	5.5145	0.9892	2.2909	0.1744	0.8648
nb214	11.4206	4.9331	0.9994	144 956.9326	5.2730	0.9843	2.1612	0.1575	0.8652
nb216	12.1979	4.7157	0.9989	219 998.4749	5.3033	0.9826	2.0787	0.1453	0.8689
nb218	12.7219	4.6465	0.9992	271 480.3434	5.2995	0.9856	2.0375	0.1379	0.8756
nb220	12.8751	4.3352	0.9980	87 462.3266	4.8289	0.9787	2.9964	0.1704	0.9148
nb36	7.4335	4.3736	0.9995	18 606.7835	5.4125	0.9927	1.6975	0.2081	0.8553
nb37	8.5739	4.7018	0.9996	14 456.4526	4.9119	0.9909	1.6207	0.1723	0.8374
nb38	9.9398	4.5631	0.9989	61 671.4153	5.2288	0.9925	1.5309	0.1356	0.8062
nb39	10.7571	4.9915	0.9996	161 243.7788	5.4575	0.9921	1.5254	0.1264	0.8010
nb310	11.1440	5.2463	0.9990	290 117.2490	5.6138	0.9928	1.5024	0.1181	0.7825
nb312	12.3937	4.8770	0.9998	337 891.0102	5.4422	0.9898	2.0051	0.1352	0.8449
nb314	13.1271	4.7128	0.9990	222 021.1057	5.1569	0.9874	1.9570	0.1270	0.8527
nb316	14.8284	4.4170	0.9888	191 006.4715	4.8611	0.9849	2.4158	0.1257	0.8745
nb318	14.1644	4.5603	0.9958	146 975.2223	4.8461	0.9811	4.5658	0.1850	0.9405
nb320	14.1249	4.5440	0.9963	143 774.8704	4.8441	0.9821	4.6175	0.1864	0.9426
nc16	6.5065	3.4097	0.9957	153 989.0219	6.8541	0.9780	1.7574	0.2541	0.9117
nc17	7.5132	3.8541	0.9978	10 217.4714	5.0734	0.9834	1.6734	0.2068	0.8755
nc18	8.3998	3.7671	0.9989	2865.4339	4.2044	0.9829	1.6238	0.1806	0.8774
nc19	8.9751	4.0499	0.9977	4458.9634	4.2726	0.9743	2.6093	0.2303	0.9157
nc110	9.4583	4.1664	0.9988	9703.6706	4.5144	0.9800	2.5030	0.2120	0.9091
nc112	10.2340	3.9895	0.9976	14 905.1347	4.5502	0.9796	2.3070	0.1879	0.9071
nc114	10.7816	3.9793	0.9985	16 494.3108	4.4943	0.9804	2.2067	0.1728	0.9011
nc116	11.3042	4.0685	0.9996	21 755.3815	4.5207	0.9850	2.1864	0.1638	0.9073

续表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	*c*	R^2	*b*	*c*	R^2	*l*	*m*	R^2
nc118	11.6242	4.1270	0.9998	23 965.2065	4.5067	0.9875	2.1373	0.1559	0.9017
nc120	11.7478	4.0307	0.9996	20 444.9071	4.4227	0.9888	2.1103	0.1529	0.9032
nc26	5.1336	4.0298	0.9992	1657.7169	5.2096	0.9967	2.0134	0.3464	0.8971
nc27	6.2740	4.0870	0.9996	922 139.3166	7.9692	0.9890	1.7949	0.2596	0.8781
nc28	7.0945	4.5669	0.9995	89 297.7444	6.3458	0.9952	1.7313	0.2227	0.5625
nc29	7.6821	4.4985	0.9999	15 381.5039	5.2249	0.9937	1.6808	0.1973	0.8497
nc210	8.3254	4.6411	0.9991	12 931.8833	4.9304	0.9919	1.6092	0.1716	0.8221
nc212	9.3565	4.1778	0.9998	7621.5273	4.4242	0.9839	1.5597	0.1517	0.8392
nc214	10.0794	3.8754	0.9998	10 794.5175	4.4363	0.9864	1.5397	0.1416	0.8563
nc216	10.9202	3.9869	0.9995	21 401.0726	4.5794	0.9844	2.1736	0.1685	0.8989
nc218	11.3277	3.7609	0.9996	12 238.1726	4.2832	0.9896	2.1664	0.1625	0.9189
nc220	11.5774	3.8182	0.9992	12 807.8528	4.2643	0.9897	2.1379	0.1572	0.9132
nc36	5.7153	3.8821	0.9998	540.4592	4.2072	0.9911	1.9183	0.3026	0.9072
nc37	7.1409	3.1041	0.9877	173.3630	3.1062	0.9670	1.6440	0.2112	0.8945
nc38	7.5346	4.5427	0.9980	31 662.8653	5.6353	0.9910	3.3463	0.3074	0.9146
nc39	8.2690	4.1558	0.9996	5439.9379	4.5415	0.9842	2.9806	0.2662	0.9303
nc310	8.8457	4.0646	0.9970	3833.1766	4.2263	0.9712	2.5986	0.2310	0.9077
nc312	9.8063	3.8969	0.9977	7953.0369	4.3499	0.9739	2.3272	0.1966	0.9039
nc314	10.5356	3.6983	0.9980	15 125.5305	4.4959	0.9814	2.1706	0.1762	0.9073
nc316	11.1847	3.8035	0.9983	13 370.8902	4.3340	0.9797	2.1316	0.1624	0.9065
nc318	11.9464	3.6460	0.9989	8161.7977	4.0231	0.9830	2.0509	0.1488	0.9122
nc320	12.3124	3.9358	0.9985	19 045.0507	4.3145	0.9885	3.2423	0.1854	0.9475
nd16	5.1626	3.9326	0.9994	1299.4822	5.0333	0.9976	2.0187	0.3512	0.9194
nd17	5.9084	3.7077	0.9999	410.5199	3.9672	0.9896	1.8909	0.2926	0.9201
nd18	6.7304	4.0859	0.9994	120 164.9350	6.6519	0.9918	1.7694	0.2417	0.8886
nd19	7.2684	4.1507	0.9994	25 177.6317	5.6192	0.9925	1.6984	0.2149	0.8701
nd110	7.6267	4.0737	0.9998	10 377.5848	5.0499	0.9922	1.6910	0.2063	0.8809
nd112	8.5137	3.8541	0.9994	4138.7321	4.3477	0.9869	1.6086	0.1759	0.8718
nd114	8.8730	3.7686	0.9992	3694.4591	4.2121	0.9864	1.5907	0.1698	0.8793
nd116	9.4202	3.5823	0.9997	2325.9201	3.8906	0.9864	1.5705	0.1565	0.8815

续表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	c	R^2	b	c	R^2	l	m	R^2
nd118	9.9531	3.5576	0.9994	2713.3607	3.8603	0.9868	2.3423	0.1945	0.9374
nd120	10.3628	3.6145	0.9998	5017.1371	4.0606	0.9867	2.3103	0.1863	0.9364
nd26	4.7193	2.8292	0.9983	507.7679	4.6525	0.9919	1.9917	0.3846	0.9478
nd27	5.6088	3.0306	0.9994	210.6714	3.6952	0.9877	1.8405	0.3051	0.9347
nd28	6.2204	3.1536	0.9987	191.2356	3.4165	0.9791	1.7073	0.2575	0.9069
nd29	6.7506	3.3022	0.9989	268.1733	3.4411	0.9777	1.6872	0.2367	0.9045
nd210	7.2979	3.2495	0.9987	2520.3512	4.4181	0.9847	1.6231	0.2101	0.8972
nd212	8.2468	3.3311	0.9983	2091.2151	4.0858	0.9833	1.5762	0.1820	0.8906
nd214	9.0553	3.1236	0.9990	1112.1130	3.6260	0.9823	1.5353	0.1633	0.8989
nd216	9.7882	3.1714	0.9997	1225.1722	3.5457	0.9831	1.5453	0.1519	0.9041
nd218	10.2659	3.1274	0.9998	1150.1739	3.4428	0.9858	1.5234	0.1415	0.9014
nd220	10.8038	3.2477	0.9997	2141.5923	3.6316	0.9865	2.1572	0.1719	0.9415
nd36	4.9750	3.2366	1.0000	505.7928	4.5286	0.9970	2.0974	0.3749	0.9540
nd37	5.8372	3.5817	0.9994	351.2345	3.9048	0.9859	1.8563	0.2915	0.9094
nd38	6.5863	3.8178	0.9997	581.0152	3.8924	0.9835	1.7719	0.2488	0.8968
nd39	7.1486	3.6959	0.9995	10 514.7293	5.2095	0.9898	1.6858	0.2197	0.8858
nd310	7.6498	3.5666	0.9986	3082.4741	4.4324	0.9841	1.6237	0.1979	0.8763
nd312	8.4605	3.3508	0.9980	1347.9526	3.8329	0.9784	1.5850	0.1775	0.8888
nd314	9.2551	3.3264	0.9981	1202.3803	3.6248	0.9771	1.5654	0.1613	0.8932
nd316	9.6967	3.3168	0.9978	1203.6450	3.5520	0.9736	2.3578	0.2031	0.9422
nd318	10.1469	3.3457	0.9979	1493.1477	3.5761	0.9779	2.3403	0.1932	0.9488
nd320	10.8640	3.6311	0.9997	7663.3776	4.1586	0.9851	3.7686	0.2263	0.9628
ne16	5.1376	3.5029	0.9999	666.0029	4.6264	0.9959	2.0752	0.3597	0.9392
ne17	5.6711	3.8222	0.9999	523.0438	4.2086	0.9918	1.9280	0.3064	0.9112
ne18	6.3947	3.8850	0.9999	454.7743	3.8231	0.9823	1.7832	0.2528	0.8862
ne19	6.7436	3.6298	0.9997	444.0308	3.7002	0.9805	1.7547	0.2414	0.9040
ne110	7.0394	3.5428	0.9996	8717.4863	5.1429	0.9877	1.7056	0.2256	0.8999
ne112	7.5331	3.4008	0.9998	3165.1442	4.4763	0.9896	1.6683	0.2089	0.9083
ne114	8.0263	3.3061	0.9999	1763.2943	4.0648	0.9885	1.6543	0.1959	0.9162
ne116	8.7104	3.3215	0.9989	1176.7167	3.7233	0.9840	2.6654	0.2411	0.9579

续表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	c	R^2	b	c	R^2	l	m	R^2
ne118	9.3061	3.3429	0.9978	1304.6913	3.6617	0.9894	2.5880	0.2217	0.9632
ne120	9.7038	3.5817	0.9988	2753.5349	3.9184	0.9916	2.5037	0.2078	0.9525
ne26	4.5277	3.0195	0.9979	1629.4053	5.5572	0.9947	2.1236	0.4186	0.9485
ne27	5.1938	3.2334	0.9992	459.3282	4.3562	0.9936	1.9575	0.3444	0.9364
ne28	5.9288	3.2417	0.9991	257.0280	3.6932	0.9867	1.8031	0.2854	0.9257
ne29	6.5126	3.0859	0.9989	204.8241	3.3706	0.9842	1.6907	0.2464	0.9177
ne210	6.9799	3.0502	0.9994	225.3740	3.2956	0.9813	1.6646	0.2289	0.9225
ne212	7.9545	3.2242	0.9997	1308.8898	3.9398	0.9870	2.9311	0.2783	0.9673
ne214	8.5297	2.9417	0.9995	739.2307	3.5444	0.9866	2.5667	0.2429	0.9693
ne216	8.9660	2.9591	0.9990	731.9982	3.4641	0.9875	2.5091	0.2286	0.9712
ne218	9.5487	2.9155	0.9980	693.9580	3.3403	0.9908	2.3649	0.2068	0.9713
ne220	10.1102	3.0502	0.9980	1012.7632	3.4184	0.9920	2.3034	0.1917	0.9666
ne36	4.7116	3.2477	0.9987	1464.5215	5.3787	0.9962	2.1170	0.4017	0.9474
ne37	5.5688	3.1830	0.9984	283.5046	3.8903	0.9860	1.8419	0.3081	0.9230
ne38	6.0843	3.2401	0.9986	234.0654	3.5845	0.9821	1.7734	0.2752	0.9208
ne39	6.6321	3.0601	0.9973	166.2049	3.2223	0.9720	1.6665	0.2406	0.9136
ne310	7.0666	3.1307	0.9984	200.9767	3.2058	0.9709	1.6631	0.2233	0.9114
ne312	7.6854	3.0362	0.9989	633.7859	3.6341	0.9786	1.6311	0.2033	0.9190
ne314	8.3575	3.1231	0.9996	1105.7403	3.7659	0.9819	2.6328	0.2508	0.9566
ne316	9.0691	3.4155	0.9994	1656.5986	3.8144	0.9864	2.6025	0.2289	0.9543
ne318	9.9964	3.8288	0.9989	6225.1904	4.2205	0.9900	2.4364	0.1974	0.9329
ne320	10.5352	4.3162	0.9972	31 243.8580	4.8139	0.9942	4.6923	0.2539	0.9688
ne46	4.5472	3.3532	0.9972	5228.0411	6.3581	0.9959	2.1671	0.4215	0.9364
ne47	5.1131	3.8990	0.9990	1549.6977	5.1803	0.9967	2.0389	0.3566	0.9172
ne48	5.7271	3.9627	0.9995	603.9397	4.2652	0.9710	1.8941	0.2992	0.8996
ne49	6.1414	3.8590	0.9996	439.9429	3.9107	0.9848	1.8496	0.2767	0.9080
ne410	6.5585	3.8082	0.9997	474.9448	3.7932	0.9822	1.7886	0.2512	0.9030
ne412	7.1585	3.3715	0.9997	2649.1316	4.4928	0.9864	1.7127	0.2259	0.9157
ne414	7.8929	3.4681	0.9996	2647.7297	4.2943	0.9857	2.9652	0.2815	0.9548
ne416	8.0821	3.3909	0.9997	1883.7595	4.0822	0.9853	2.8646	0.2701	0.9566

续表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	*c*	R^2	*b*	*c*	R^2	*l*	*m*	R^2
ne418	8.4678	3.2953	0.9993	1279.6235	3.8165	0.9869	2.7706	0.2540	0.9649
ne420	9.0703	3.6879	0.9996	2423.5092	3.9795	0.9881	2.6436	0.2291	0.9492
ne56	4.1556	2.7448	0.9999	1080.1267	5.4989	0.9957	2.3421	0.4861	0.9806
ne58	6.1745	5.0351	0.9987	2166.2590	4.7323	0.9891	6.8949	0.5024	0.9827
ne510	7.9982	6.1362	0.9996	76 874.1645	5.8785	0.9945	3.4091	0.2859	0.9056
ne512	9.5937	7.6307	0.9991	18 759 661.5000	7.8500	0.9991	2.5253	0.1967	0.8191
ne514	10.7377	6.6634	0.9977	4 566 723.3120	6.8580	0.9953	4.6983	0.2414	0.8976
ne516	11.4286	6.3951	0.9972	23 324 308.6900	7.3700	0.9934	13.6636	0.3290	0.9591
ne520	13.9508	10.5529	0.9956	253 744 665 033.0000	10.3211	0.9956	439.5184	0.5218	0.9899
qa16	4.5572	1.7692	0.9911	7.3948	1.9863	0.9780	1.6937	0.3591	0.9920
qa17	6.9021	2.3331	0.9887	56.0394	2.5784	0.9477	1.4935	0.2146	0.9233
qa18	8.8924	2.8381	0.9982	545.6238	3.3290	0.9758	1.5282	0.1675	0.9139
qa19	9.9941	3.4482	0.9945	3310.0601	3.9332	0.972	1.5255	0.147	0.8829
qa110	11.1518	3.6120	0.9934	9594.6805	4.1957	0.9680	1.4839	0.1268	0.8585
qa111	12.1822	3.7430	0.9933	14 708.2737	4.2166	0.9691	1.4712	0.1151	0.8531
qa112	13.2057	4.3400	0.9965	99 111.2987	4.8263	0.9744	1.8967	0.1255	0.8557
qa114	15.0725	4.4567	0.9921	220 441.3579	4.8828	0.9635	2.3545	0.1260	0.8610
qa116	16.8436	4.7852	0.9924	660 742.3932	5.0782	0.9633	2.1867	0.1064	0.8444
qa118	18.0559	4.8310	0.9964	1 687 742.4330	5.2830	0.9763	2.1462	0.0990	0.8576
qa120	18.9386	4.4629	0.9965	505 865.9007	4.7866	0.9727	2.0309	0.0906	0.8568
qa26	5.8492	2.8452	0.9952	161.9232	3.4464	0.9755	1.6851	0.2761	0.9150
qa27	8.4723	3.4651	0.9935	2219.0303	4.0582	0.9772	1.4960	0.1697	0.8566
qa28	10.5426	4.3546	0.9971	84 488.7718	5.2286	0.9892	1.4799	0.1292	0.8164
qa29	11.8951	5.1869	0.9950	8 977 597.1400	6.8540	0.9902	1.9984	0.1423	0.8322
qa210	13.3443	5.0918	0.9987	881 222.7739	5.6530	0.9871	1.8996	0.1219	0.8310
qa211	14.5923	5.7672	0.9977	25 664 331.5900	6.7200	0.9933	1.8183	0.1068	0.8055
qa212	15.1174	5.5437	0.9987	8 917 835.8660	6.2510	0.9955	1.8467	0.1046	0.8238
qa214	16.7909	6.0021	0.9986	52 905 329.5900	6.6400	0.9947	2.3100	0.1085	0.8390
qa216	18.7590	5.6715	0.9987	28 483 835.8200	6.1800	0.9945	2.1017	0.0909	0.8264
qa218	19.7429	5.2979	0.9987	104.6745	1.5203	0.9869	1.3022	0.0337	0.9614

续表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	*c*	R^2	*b*	*c*	R^2	*l*	*m*	R^2
qa220	20.2541	5.0880	0.9993	7 519 551.5280	5.5810	0.9905	2.0110	0.0835	0.8465
qa36	5.3883	2.1062	0.9802	2 762 874.2630	5.3460	0.9711	1.5053	0.2795	0.9224
qa37	8.2256	2.7049	0.9953	172.2161	2.8946	0.9613	1.5355	0.1817	0.9181
qa38	9.9994	3.1712	0.9943	912.7028	3.3752	0.9634	1.4708	0.1415	0.8720
qa39	12.0959	3.7735	0.9928	14 116.1940	4.2097	0.9672	1.4427	0.1113	0.8349
qa310	12.2988	4.2134	0.9939	63 357.2833	4.6376	0.9697	1.4379	0.1001	0.8123
qa311	14.4957	4.3675	0.9930	158 465.6958	4.8283	0.9669	1.4000	0.0865	0.7886
qa312	15.2194	4.2778	0.9909	118 495.1421	4.6349	0.9613	1.7206	0.1008	0.8282
qa314	17.1549	4.7156	0.9955	963 088.8902	5.1784	0.9720	1.6549	0.0846	0.8048
qa316	19.0781	4.8288	0.9941	2 754 321.4290	5.3450	0.9711	1.5900	0.0724	0.7910
qa318	19.9512	5.1057	0.9942	10 845 446.0000	5.7300	0.9712	1.9338	0.0817	0.8152
qa320	20.8744	4.7908	0.9964	5 631 003.7200	5.4260	0.9778	1.8901	0.0772	0.8278
qb16	4.2449	1.7717	0.9938	5.8604	1.9325	0.9441	1.6115	0.3734	0.9739
qb17	6.3199	2.0472	0.9869	49.2100	2.6300	0.9498	1.4411	0.2306	0.9327
qb18	7.5623	2.1891	0.9893	56.7490	2.4716	0.9482	1.4168	0.1893	0.9239
qb19	8.5501	2.4320	0.9863	91.6089	2.5398	0.9399	1.4033	0.1629	0.8984
qb110	9.3112	2.6588	0.9925	380.1571	3.0896	0.9602	1.4404	0.1532	0.8997
qb111	10.2231	2.7340	0.9883	396.5993	2.9749	0.9483	1.3977	0.1334	0.8807
qb112	11.0356	3.0258	0.9881	633.7457	3.0689	0.9478	1.4042	0.1204	0.8609
qb114	12.7344	3.1800	0.9902	2410.4340	3.4321	0.9555	1.4120	0.1068	0.8603
qb116	14.3512	3.5513	0.9953	9808.6309	3.8064	0.9649	1.7961	0.1127	0.8835
qb118	15.5995	3.7245	0.9975	28 055.0420	4.0745	0.9729	1.7559	0.1012	0.8755
qb120	16.1097	3.5224	0.9969	14 061.1114	3.7757	0.9706	1.7025	0.0954	0.8770
qb26	4.3666	2.2480	0.9973	9.1558	2.1792	0.9485	1.8938	0.4051	0.9672
qb27	6.2920	2.8995	0.9929	138.8747	3.2132	0.9639	1.6014	0.2448	0.8949
qb28	7.5790	3.0903	0.9972	1365.5096	4.0302	0.9778	0.5636	0.1967	0.8917
qb29	8.6578	3.6701	0.9977	3484.7656	4.2297	0.9858	1.5421	0.1678	0.8623
qb210	9.6546	3.4937	0.9977	2388.9146	3.8546	0.9782	1.5224	0.1501	0.8733
qb211	10.3533	3.7450	0.9972	11 569.4445	4.4088	0.9787	1.5009	0.1355	0.8534
qb212	10.8688	4.0636	0.9979	38 357.2240	4.8308	0.9877	1.5084	0.1303	0.8486

续表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	*c*	R^2	*b*	*c*	R^2	*l*	*m*	R^2
qb214	12.2246	4.2398	0.9978	50 665.3325	4.7083	0.9807	1.9806	0.1413	0.8719
qb216	13.5796	3.9788	0.9987	43 725.4724	4.4650	0.9814	1.8705	0.1223	0.8751
qb218	16.1787	7.6884	0.9978	5 091 603 465.0000	8.0000	0.9980	3.7153	0.1423	0.8484
qb220	17.5935	7.4630	0.9976	1 235 138 465.0000	8.0000	0.9946	5.7152	0.1584	0.8973
qb36	5.7491	2.9714	0.9894	3 509 892 936.0000	13.0000	0.9742	1.6799	0.2824	0.8972
qb37	8.2227	3.5784	0.9899	3068.5852	4.2659	0.9652	1.4972	0.1720	0.8379
qb38	9.5757	3.9347	0.9942	6456.4387	4.2980	0.9695	1.4857	0.1444	0.8280
qb39	10.5469	4.0654	0.9969	41 155.3544	4.9187	0.9800	1.4905	0.1314	0.8318
qb310	11.5668	4.2729	0.9974	44 645.1262	4.7665	0.9805	1.4875	0.1195	0.8279
qb311	12.2457	4.2537	0.9982	75 977.0584	4.8690	0.9846	1.4862	0.1135	0.8212
qb312	12.6606	4.3053	0.9982	146 138.8869	5.0621	0.986	1.4724	0.107	0.8719
qb314	13.7077	4.4673	0.9979	304 136.9110	5.1922	0.9883	1.4619	0.0988	0.9807
qb316	14.8990	4.4330	0.9992	263 607.5611	4.9792	0.9924	1.8611	0.1101	0.9696
qb318	17.6791	6.9880	0.9950	1 437 571 801.0000	8.0000	0.9943	50.4004	0.2877	0.9885
qb320	18.4977	6.3738	0.9936	271 401 868.1000	7.0000	0.9899	26.4035	0.2391	0.9645
qc16	3.3984	1.6621	0.9970	4.9097	2.1574	0.9699	1.7547	0.4895	0.9432
qc17	4.7524	1.6550	0.9877	5.7015	1.7718	0.9228	1.4364	0.3070	0.9452
qc18	5.7681	1.8201	0.9825	9.8432	1.8533	0.9074	1.4074	0.2491	0.9281
qc19	6.7161	1.9498	0.9880	35.9801	2.3883	0.9452	1.4238	0.2161	0.9143
qc110	7.6402	2.1328	0.9904	51.4061	2.4077	0.9499	1.4024	0.1853	0.9281
qc111	8.3465	2.2897	0.9894	88.7859	2.5659	0.9508	1.3929	0.1695	0.9143
qc112	8.8749	2.3508	0.9895	109.3013	2.5855	0.9502	1.4030	0.1590	0.9123
qc114	11.4613	4.3514	0.9980	28 184.7092	4.6040	0.9832	3.8907	0.2159	0.9493
qc116	13.0075	4.2185	0.9953	54 408.7176	4.6371	0.9885	3.1369	0.1717	0.9332
qc118	16.0355	7.9657	0.9986	21 418 640 749.0000	9.0000	0.9962	3.7571	0.1446	0.8493
qc120	17.1852	6.7926	0.9970	156 618 049.4000	7.0000	0.9902	3.3468	0.1287	0.8602
qc26	4.9064	2.7458	0.9969	373.6741	4.3500	0.9919	1.8961	0.3604	0.9485
qc27	6.6309	3.2256	0.9994	207.5251	3.3409	0.9795	1.7316	0.2454	0.9199
qc28	7.8854	3.2085	0.9973	1842.0558	4.1114	0.9834	1.5630	0.1912	0.8918
qc29	8.6473	3.3862	0.9981	1913.5059	3.9553	0.9844	1.5601	0.1733	0.8912

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	*c*	R^2	*b*	*c*	R^2	*l*	*m*	R^2
qc210	9.3649	3.3144	0.9993	1884.6757	3.8119	0.9883	1.5498	0.1594	0.8971
qc211	9.9764	3.3941	0.9993	2207.2287	3.7702	0.9859	1.5246	0.1463	0.8855
qc212	9.2565	4.4200	0.9982	19 504.5108	4.8734	0.9966	1.6244	0.1616	0.8691
qc214	12.4742	5.0437	0.9975	476 851.3854	5.5679	0.9959	3.4263	0.1844	0.9227
qc216	16.0940	7.4952	0.9933	1 795 218 811.0000	8.0000	0.9977	29.6653	0.2817	0.9764
qc218	17.2794	7.1560	0.9918	2 191 574 335.0000	8.0000	0.9961	15.8602	0.2248	0.9511
qc220	18.4035	7.0587	0.9897	1 796 252 138.0000	8.0000	0.9972	10.4658	0.1866	0.9341
qc36	5.0440	2.5379	0.9970	206 943 378 308.0000	18.8601	0.9573	1.8105	0.3411	0.9563
qc37	6.7386	2.9767	0.9991	167.7461	3.2040	0.9806	1.6826	0.2394	0.9309
qc38	7.9143	3.2275	0.9967	2772.4985	4.3032	0.9840	1.5864	0.1951	0.9044
qc39	9.0278	3.4308	0.9980	2328.1571	3.9661	0.9863	1.5498	0.1660	0.8939
qc310	10.6977	3.8948	0.9988	22 268.4019	4.6332	0.9858	1.5461	0.1376	0.8742
qc311	10.5574	3.5840	0.9983	6399.6737	4.1279	0.9812	2.1892	0.1778	0.9217
qc312	11.6996	6.0271	0.9933	5 090 770.4390	6.6730	0.9985	11.7995	0.3078	0.9751
qc314	12.7250	5.4133	0.9951	1 230 751.1380	5.8960	0.9969	7.4359	0.2456	0.9643
qc316	16.4617	7.2835	0.9903	1 446 186 109.0000	8.0000	0.9977	24.5705	0.2637	0.9733
qc318	17.4577	7.5222	0.9948	2 457 306 838.0000	8.0000	0.9957	15.1698	0.2193	0.9492
qc320	18.5573	6.5269	0.9940	375 610 918.3000	7.1000	0.9923	29.4742	0.2450	0.9777
qd16	1.7358	1.5055	1.0000	4.2447	3.6309	0.9993	2.8624	1.1447	0.9999
qd17	2.5159	1.3922	0.9979	3.3419	2.3308	0.9873	1.6290	0.6081	0.9954
qd18	3.3616	1.5989	0.9988	4.6124	2.1149	0.9761	1.6960	0.4816	0.9929
qd19	3.7520	1.6518	0.9996	5.2042	2.0302	0.9761	1.6755	0.4304	0.9940
qd110	4.5280	1.8213	0.9973	7.3173	2.0026	0.9617	1.6565	0.3577	0.9843
qd111	5.0738	1.9745	0.9968	10.6001	2.0632	0.9469	1.6059	0.3128	0.9693
qd112	5.6668	2.4074	0.9983	103.3122	3.2466	0.9899	1.7019	0.2891	0.9588
qd114	6.9327	2.4785	0.9993	82.5487	2.7967	0.9835	1.6569	0.2319	0.9625
qd116	8.7435	3.0673	0.9994	945.5472	3.6102	0.9800	2.4384	0.1294	0.9501
qd118	10.8295	4.4365	0.9952	74 342.5415	5.1209	0.9929	12.8710	0.3441	0.9900
qd120	12.0011	4.6001	0.9976	111 509.5718	5.0688	0.9891	8.2230	0.2718	0.9749
qd26	4.1986	2.0361	0.9968	195.8693	4.2195	0.9827	1.8324	0.4138	0.9760

续表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	*c*	R^2	*b*	*c*	R^2	*l*	*m*	R^2
qd27	5.9014	2.3758	0.9949	97.5161	3.1364	0.9753	1.6018	0.2678	0.9394
qd28	6.9143	2.4072	0.9914	89.6004	2.8619	0.9615	1.4899	0.2169	0.9209
qd29	7.7571	2.6579	0.9959	186.5165	3.0230	0.9698	1.5218	0.1952	0.9213
qd210	9.1660	3.8612	0.9986	4734.6678	4.2642	0.9928	2.6112	0.2241	0.9380
qd211	9.7740	3.6176	0.9994	3622.0369	4.0268	0.9876	2.4049	0.2020	0.9334
qd212	11.3897	5.5865	0.9962	855 951.1919	6.0180	0.9958	2.2052	0.1562	0.8461
qd214	12.4209	5.1112	0.9984	514 912.6012	5.6095	0.9950	2.0754	0.1390	0.8556
qd216	16.2503	9.3513	0.9938	264 340 429 276.0000	9.7749	0.9989	26.5900	0.2686	0.9382
qd218	17.2864	8.1214	0.9930	16 334 992 356.0000	9.0000	0.994	80.1420	0.320	0.9787
qd220	18.4249	7.9907	0.9912	17 752 663 063.0000	8.0000	0.9979	35.9088	0.2553	0.9702
qd36	5.3889	3.2937	0.9979	428.9358	4.2207	0.9898	1.8747	0.3226	0.9206
qd37	7.1066	3.7504	0.9980	21 034.1794	5.5818	0.9927	1.6647	0.2229	0.8883
qd38	7.8054	3.8091	0.9989	6752.0534	4.7761	0.9913	1.6257	0.1964	0.8787
qd39	8.8031	3.9426	0.9992	4502.9324	4.3179	0.9863	1.5910	0.1710	0.8714
qd310	10.8484	6.7848	0.9984	16 047 495.7900	7.3500	0.9959	4.6975	0.2401	0.9043
qd311	10.4984	5.5287	0.9968	387 705.1237	5.8908	0.9966	5.1362	0.2603	0.9421
qd312	11.5837	6.4388	0.9900	10 513 819.7300	7.0000	0.9980	13.9743	0.3261	0.9767
qd314	12.8961	5.9027	0.9970	2 671 262.8990	6.1670	0.9936	7.3247	0.2403	0.9493
qd316	16.2018	11.9762	0.9954	4.0148	11.5708	0.9990	6.9313	0.1786	0.8293
qd318	17.7610	9.0469	0.9988	515 219 926 700.0000	9.7070	0.9957	5.1872	0.1481	0.8358
qd320	18.4809	9.1353	0.9910	6.8373	10.4689	0.9972	9.7894	0.1793	0.8795
qe16	2.2255	1.5994	0.9996	4.5388	3.0089	0.9958	2.4637	0.8723	0.9988
qe17	3.1169	1.6494	0.9967	4.7468	2.2883	0.9753	1.8478	0.5490	0.9901
qe18	3.8796	1.8492	0.9972	6.1724	2.1164	0.9627	1.7936	0.4394	0.9834
qe19	5.2884	2.9223	0.9992	183.0010	3.7437	0.9952	2.0182	0.3452	0.9686
qe110	5.7964	3.2167	0.9997	232.8005	3.6832	0.9943	1.9071	0.3004	0.9469
qe111	6.2511	3.3316	0.9992	260.9334	3.5816	0.9927	1.8418	0.2700	0.9328
qe112	7.1405	3.7240	0.9992	5433.6751	4.8766	0.9931	3.8225	0.3489	0.9718
qe114	8.0363	3.8457	0.9994	4435.1434	4.5070	0.9924	3.0490	0.2770	0.9476
qe116	10.1230	5.7620	0.9962	678 582.5382	6.2243	0.9978	5.5927	0.2776	0.9382

续表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	c	R^2	b	c	R^2	l	m	R^2
qe118	10.9862	5.1368	0.9928	231 806.1435	5.5653	0.9974	4.4394	0.2340	0.9371
qe120	11.8156	4.9216	0.9925	228 565.9024	5.3917	0.9936	9.6959	0.2897	0.9802
qe26	2.7873	1.6719	0.9983	1 960 177.4350	11.6640	0.9819	2.0939	0.6571	0.9945
qe27	4.0516	1.8413	0.9907	226.0640	4.3461	0.9739	1.6960	0.4062	0.9696
qe28	4.9227	1.9412	0.9908	83.4462	3.3354	0.9690	1.5778	0.3198	0.9589
qe29	6.5216	3.5173	0.9999	324.8038	3.6092	0.9878	1.7954	0.2529	0.9197
qe210	7.1732	3.4911	0.9985	1251.8135	4.1148	0.9937	1.7388	0.2243	0.9150
qe211	8.3782	4.9145	0.9974	20 116.3776	5.1217	0.9959	3.0930	0.2619	0.9197
qe212	9.4889	6.0068	0.9955	1 110 168.7150	6.6240	0.9990	7.5488	0.3305	0.9629
qe214	11.0054	5.4528	0.9961	424 614.6608	5.8037	0.9922	14.9068	0.3512	0.9816
qe216	12.7202	5.3184	0.9981	1 106 524.4000	5.8530	0.9915	6.9696	0.2406	0.9508
qe218	15.2992	8.0911	0.9964	6 027 351 453.0000	9.0000	0.9982	4.0733	0.1563	0.8415
qe220	16.8228	7.4068	0.9992	2 643 746 377.0000	8.0000	0.9949	3.3654	0.1308	0.8328
qe36	3.8283	2.2576	0.9975	8.5080	2.3832	0.9642	2.1795	0.5060	0.9790
qe37	5.2372	2.6030	0.9991	158.3107	3.6598	0.9887	1.8191	0.3274	0.9536
qe38	5.9510	2.5470	0.9973	108.1118	3.1860	0.9785	1.6664	0.2723	0.9415
qe39	7.7045	4.4359	0.9976	8921.4956	4.9500	0.9925	3.6206	0.3110	0.9490
qe310	9.3217	5.0392	0.9960	192 557.1265	5.8934	0.9930	7.4495	0.3387	0.9678
qe311	9.6016	5.4675	0.9980	546 494.2153	6.2795	0.9966	6.7705	0.3166	0.9588
qe312	10.8130	7.4689	0.9873	325 733 042.7000	8.6000	0.9992	27.7460	0.4151	0.9829
qe314	12.1549	6.9723	0.9941	49 667 623.6600	7.4900	0.9980	9.9336	0.2790	0.9408
qe316	15.4022	9.0799	0.9977	1.1232	10.4944	0.9953	45.9790	0.3221	0.9524
qe318	16.4122	8.4379	0.9934	41 395 786 161.0000	9.0000	0.9980	23.5681	0.2595	0.9422
qe320	17.9223	7.3966	0.9972	1 815 035 770.0000	8.0000	0.9929	11.8571	0.1984	0.9276
sa19	8.9426	4.6382	0.9998	14 939.9632	4.8227	0.9862	1.6007	0.1628	0.8343
sa110	9.9278	4.3829	0.9993	90 288.6658	5.3963	0.9872	2.3595	0.1936	0.8907
sa111	10.6802	4.4837	0.9994	77 758.0967	5.1692	0.9882	2.2299	0.1743	0.8833
sa112	12.1055	5.1216	0.9988	473 517.6722	5.6273	0.9861	2.0431	0.1410	0.8397
sa114	12.3678	4.9220	0.9989	244 965.7990	5.3197	0.9868	3.3394	0.1830	0.9068
sa116	13.4286	4.3970	0.9982	101 906.1311	4.8173	0.9914	2.9783	0.1610	0.9231

续表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	c	R^2	b	c	R^2	l	m	R^2
sa118	14.4965	4.4520	0.9987	173 993.7954	4.8761	0.9850	4.4289	0.1797	0.9440
sa120	15.3315	4.6085	0.9995	340 394.3790	5.0192	0.9842	3.9397	0.1609	0.9299
sa29	8.3749	3.1215	0.9984	900.1869	3.6597	0.9887	2.6612	0.2501	0.9662
sa210	9.5814	3.0840	0.9974	767.7679	3.3698	0.9824	1.3417	0.2040	0.9580
sa211	11.4458	4.4589	0.9911	67 931.4783	4.9595	0.9949	9.7119	0.2990	0.9882
sa212	11.8746	5.0799	0.9933	387 610.6836	5.5837	0.9952	8.9955	0.2801	0.9749
sa214	13.3904	4.8406	0.9950	294 271.4266	5.2242	0.990	5.7466	0.213	0.9574
sa216	14.9684	5.9863	0.9931	13 470 760.4000	6.4300	0.9974	11.1060	0.2360	0.9692
sa218	15.9222	5.8012	0.9956	10 409 679.2200	6.1900	0.9955	8.2798	0.2030	0.9594
sa220	16.5343	5.4970	0.9953	4 765 867.1590	5.8300	0.9920	6.9546	0.1848	0.9540
sa310	10.1892	3.3061	0.9984	2393.4328	3.7696	0.9909	1.5200	0.1416	0.8890
sa311	11.4639	4.1095	0.9968	23 198.3699	4.5226	0.9951	2.1395	0.1553	0.8944
sa312	11.8252	3.8594	0.9955	16 203.3270	4.3263	0.9948	2.1155	0.1513	0.9070
sa314	13.1970	4.0369	0.9945	29 105.7654	4.3601	0.9846	5.4295	0.2142	0.9708
sa316	14.5388	4.3394	0.9950	81 652.8303	4.5863	0.9869	4.4422	0.1784	0.9544
sa318	15.2859	4.0547	0.9929	43 611.8365	4.2721	0.9834	3.8424	0.1594	0.9489
sa320	16.5156	3.8742	0.9973	29 190.6087	4.0057	0.9754	3.2146	0.1362	0.9379
sa410	10.7312	4.1993	0.9993	24 130.2251	4.6640	0.9920	2.2787	0.1745	0.9069
sa411	13.0184	6.8751	0.9931	36 771 521.1000	7.1600	0.9984	3.0067	0.1576	0.8329
sa412	13.3027	6.1482	0.9918	10 110 413.7600	6.6100	0.9973	2.9077	0.1524	0.8383
sa414	15.3726	6.5803	0.9997	66 663 069.4400	6.9400	0.9707	32.3811	0.3020	0.9496
sa416	16.7220	6.8671	0.9947	480 577 632.9000	7.4000	0.9930	17.4644	0.2377	0.9512
sa418	17.8712	6.9373	1.0000	637 527 585.9000	7.4000	0.9832	10.8695	0.1950	0.9143
sa420	18.5669	7.0546	0.9986	808 474 016.3000	7.3000	0.9861	9.1710	0.1769	0.9091
sb19	5.7531	2.7300	0.9999	120.4369	3.3077	0.9877	1.7732	0.2893	0.9473
sb110	6.7413	3.1380	0.9992	233.5251	3.3788	0.9915	1.7665	0.2442	0.9386
sb111	7.8333	3.3039	0.9993	1610.4683	4.0660	0.9892	2.9908	0.2839	0.9645
sb112	8.4631	3.4587	0.9981	2387.6663	4.1071	0.9926	2.7364	0.2502	0.9526
sb114	9.5800	3.3420	0.9990	1716.7640	3.7320	0.9904	2.4127	0.2066	0.9497
sb116	10.4114	3.6368	0.9996	4953.6384	4.0461	0.9858	2.2800	0.1829	0.9282

续表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	c	R^2	b	c	R^2	l	m	R^2
sb118	11.0615	3.4489	0.9994	4384.9794	3.8914	0.9845	2.1382	0.1650	0.9268
sb120	12.0437	3.4887	0.9995	7898.7305	4.0008	0.9829	3.0944	0.1869	0.9504
sb122	12.2771	3.2780	0.9997	4462.9381	3.7417	0.9809	2.9318	0.1789	0.9546
sb125	13.1621	3.1945	0.9984	3809.4325	3.5804	0.9831	2.7256	0.1609	0.9580
sb29	5.9514	3.2960	0.9997	247.1438	3.6555	0.9908	1.8302	0.2816	0.9239
sb210	6.8819	3.4045	0.9999	368.6145	3.5663	0.9854	1.7259	0.2330	0.9102
sb211	7.7173	3.6418	0.9995	2960.8878	4.3954	0.9839	3.1397	0.2935	0.9484
sb212	8.4259	3.6234	0.9990	2947.2234	4.2143	0.9873	2.7525	0.2514	0.9381
sb214	9.5775	4.0853	0.9998	10 129.6719	4.5126	0.9860	2.4959	0.2084	0.9146
sb216	11.2657	5.2082	0.9987	222 863.8994	5.4870	0.9909	4.1929	0.2239	0.9282
sb218	11.7223	4.5067	0.9984	48 579.5532	4.7818	0.9881	3.7889	0.2080	0.9442
sb220	12.4075	4.1831	0.9988	30 391.9464	4.4846	0.9855	3.3076	0.1847	0.9399
sb222	12.7630	3.9202	0.9980	19 694.6275	4.2692	0.9888	3.1667	0.1767	0.9493
sb225	13.7282	3.7910	0.9985	17 028.8427	4.0908	0.9855	2.7858	0.1535	0.9383
sb39	5.9803	3.4588	0.9999	287.0598	3.7333	0.9921	1.8993	0.2888	0.9358
sb310	7.0425	4.1684	0.9999	27 412.5673	5.7473	0.9955	1.7692	0.2301	0.8965
sb311	8.0329	4.0990	0.9999	6211.7779	4.6718	0.9942	1.6877	0.1946	0.8895
sb312	8.6677	4.2524	0.9999	6122.8477	4.4924	0.9881	2.8661	0.2483	0.9331
sb314	10.2059	5.9492	0.9989	649 908.3100	6.1847	0.9941	5.6945	0.2786	0.9411
sb316	11.5532	5.9018	0.9907	1 520 671.0590	6.1940	0.9939	11.0327	0.3039	0.9705
sb318	12.7063	6.0452	0.9987	4 252 524.1840	6.3860	0.9925	7.6068	0.2472	0.9440
sb320	13.1774	5.0520	0.9983	491 394.3064	5.4638	0.9882	6.3466	0.2263	0.9548
sb322	13.7787	5.1361	0.9993	652 300.5014	5.4745	0.9850	5.3753	0.2031	0.9376
sb325	14.7458	4.6200	0.9976	348 513.7254	5.1048	0.9930	4.3477	0.1742	0.9416
sb327	14.8801	4.5701	0.9982	275 536.0868	4.9996	0.9911	4.2285	0.1707	0.9406
sb49	6.3685	3.6188	0.9995	124 798.0851	6.8190	0.9850	1.7978	0.2622	0.9101
sb410	7.4570	4.0381	0.9990	16 039.6805	5.3200	0.9940	1.6977	0.2118	0.8869
sb411	8.3837	4.5568	0.9995	11 316.4185	4.8518	0.9890	1.6403	0.1797	0.8516
sb412	9.0800	4.3623	0.9993	9886.5643	4.6027	0.9875	1.6137	0.1646	0.8611
sb414	10.8493	6.8837	0.9978	64 634 848.8900	7.9400	0.9965	4.5220	0.2350	0.8826

续表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	*c*	R^2	*b*	*c*	R^2	*l*	*m*	R^2
sb416	12.5108	7.0853	0.9989	54 464 088.0600	7.4300	0.9866	52.2447	0.4115	0.9757
sb418	13.4945	6.4044	0.9926	29 452 155.4000	6.9900	0.9931	23.7757	0.3217	0.9783
sb420	14.5550	5.8516	0.9926	6 044 928.3480	6.1990	0.9806	12.8593	0.2553	0.9600
sb422	15.4117	5.6204	0.9928	5 192 270.6060	6.0140	0.9849	9.1514	0.2171	0.9511
sb425	16.7973	5.6245	0.9939	5 605 548.9030	5.8850	0.982	6.4083	0.176	0.9311
sb427	16.9500	5.1453	0.9963	1 712 770.3860	5.4150	0.9833	5.9168	0.1700	0.9388
sc19	5.8517	2.9630	0.9997	173.8596	3.4988	0.9871	1.8231	0.2924	0.9437
sc110	6.8957	3.5564	0.9995	638.5815	3.8445	0.9843	1.7183	0.2321	0.8979
sc111	7.7196	3.7192	0.9999	5096.0986	4.6666	0.9911	1.6695	0.2026	0.8913
sc112	9.2232	4.1530	0.9998	6112.3146	4.3558	0.9840	1.5707	0.1555	0.8436
sc114	9.8048	5.4781	0.9986	434 742.7514	6.1225	0.9968	2.5386	0.1994	0.8764
sc116	10.8773	6.1980	0.9953	1 553 980.4280	6.3680	0.9966	4.4448	0.2325	0.9049
sc118	11.7194	5.7705	0.9958	1 999 703.0110	6.2900	0.9973	3.8023	0.2027	0.9022
sc120	12.4674	5.6093	0.9977	2 767 934.2600	6.2680	0.9968	3.4017	0.1819	0.8982
sc122	13.0992	5.0640	0.9987	639 757.0841	5.5709	0.9933	3.0358	0.1640	0.8994
sc125	14.0127	4.5926	0.9996	209 517.4647	5.0081	0.9896	2.7783	0.1480	0.9054
sc127	14.4183	4.6807	0.9993	281 159.5398	5.0624	0.9908	2.7109	0.1421	0.9057
sc29	5.9706	3.0760	0.9998	167.9427	3.4306	0.9855	1.8158	0.2812	0.9334
sc210	6.9425	3.7669	0.9990	26 513.7154	5.7604	0.9880	1.7433	0.2321	0.8975
sc211	7.8601	3.7760	0.9998	4104.5651	4.5222	0.9870	3.1669	0.2907	0.9497
sc212	8.9684	4.1715	0.9975	4247.0004	4.2449	0.9716	2.6185	0.2282	0.9088
sc214	10.3146	5.5554	0.9984	396 341.0894	5.9470	0.9938	5.3086	0.2686	0.9355
sc216	11.8483	5.3134	0.9914	750 089.0951	5.8710	0.9946	10.5893	0.2965	0.9779
sc218	13.0286	5.5831	0.9928	2 249 723.0640	6.0780	0.9976	6.7843	0.2312	0.9494
sc220	14.0297	5.1174	0.9908	990 690.2048	5.5978	0.9968	5.2632	0.1958	0.9450
sc222	14.7925	4.8458	0.9938	539 890.8073	5.2610	0.9933	4.4325	0.1735	0.9368
sc225	15.3959	4.4783	0.9957	221 310.5539	4.8564	0.9940	3.9948	0.1603	0.9452
sc227	15.8060	4.0642	0.9934	84 024.2234	4.4635	0.9949	3.7727	0.1534	0.9571
sc39	4.4961	2.6863	0.9989	200.1805	4.1476	0.9973	2.1834	0.4274	0.9860
sc310	7.1971	2.9686	0.9986	200.9112	3.1755	0.9858	1.6717	0.2197	0.9344

续表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	*c*	R^2	*b*	*c*	R^2	*l*	*m*	R^2
sc311	8.2186	3.3404	0.9997	1641.7441	3.9820	0.9913	1.6205	0.1844	0.9013
sc312	9.0525	3.3086	0.9988	1269.2758	3.6880	0.9858	2.5133	0.2237	0.9516
sc314	10.2765	3.5647	0.9993	3093.9815	3.8636	0.9891	1.5288	0.1370	0.8673
sc316	11.7838	3.9622	0.9990	17 439.0279	4.3531	0.9817	3.3424	0.1957	0.9346
sc318	12.6302	4.0219	0.9998	28 013.5589	4.4208	0.9830	3.0327	0.1743	0.9260
sc320	13.1763	3.5119	0.9983	7433.2898	3.8293	0.9761	2.6586	0.1563	0.9274
sc322	14.1030	3.5001	0.9984	11 772.6298	3.9057	0.9764	2.4765	0.1408	0.9210
sc325	15.3329	3.2804	0.9982	6301.2345	3.5561	0.9785	2.3017	0.1242	0.9333
sc49	5.7773	3.2797	0.9999	241.3838	3.7094	0.9918	1.8951	0.2982	0.9349
sc410	6.8627	3.4367	0.9998	365.9698	3.5651	0.9862	1.7435	0.2345	0.9140
sc411	7.6469	3.8624	0.9992	5758.3570	4.7452	0.9941	1.6642	0.1981	0.8745
sc412	8.3526	3.7839	0.9994	2751.0462	4.1989	0.9865	2.9275	0.2617	0.9466
sc414	9.0227	3.4939	0.9994	1701.6225	3.8303	0.9795	2.5677	0.2279	0.9417
sc416	10.3645	3.5615	0.9990	4443.8345	4.0110	0.9842	2.2937	0.1851	0.9298
sc418	10.8049	3.2854	0.9992	1941.9145	3.5892	0.9789	2.1569	0.1714	0.9334
sc420	11.6965	3.1279	0.9979	1514.9169	3.3657	0.9736	1.9567	0.1477	0.9214
sc422	12.3690	2.9083	0.9984	1456.6759	3.2842	0.9796	1.9279	0.1407	0.9406
sc425	13.0945	2.7780	0.9986	1010.9781	3.0647	0.9810	1.8345	0.1278	0.9415
sc427	13.8700	3.1436	0.9934	2786.1320	3.3868	0.9787	2.5763	0.1472	0.9535
sd19	7.6643	2.8277	0.9978	166.5837	2.9854	0.9708	1.6269	0.2042	0.9319
sd110	8.5604	3.0022	0.9973	834.8696	3.5860	0.9759	1.5829	0.1790	0.9170
sd111	10.2980	5.2343	0.9992	232 180.5893	5.7200	0.9925	5.1008	0.2656	0.9379
sd112	10.8340	4.9662	0.9987	100 217.9981	5.2415	0.9915	4.5293	0.2414	0.9446
sd114	12.1680	5.0466	0.9986	635 088.4902	5.7305	0.9885	7.7224	0.2612	0.9566
sd116	13.8471	5.1834	0.9954	1 282 202.6530	5.7210	0.9902	14.3183	0.2759	0.9771
sd118	14.4223	5.1782	0.9966	1 648 920.6380	5.7260	0.9898	11.1599	0.2467	0.9688
sd120	15.4934	4.5530	0.9954	329 676.7120	4.9928	0.9876	7.6198	0.2049	0.9694
sd122	16.4064	3.9780	0.9924	70 839.6260	4.3371	0.9851	5.5996	0.1737	0.9714
sd125	18.6309	3.7643	0.9949	30 479.1553	3.8504	0.9683	3.7165	0.1288	0.9438
sd127	19.1221	3.9772	0.9935	56 734.0370	4.0274	0.9732	3.7007	0.1245	0.9414

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	c	R^2	b	c	R^2	l	m	R^2
sd29	6.7340	2.5141	0.9987	78.2373	2.8125	0.9858	1.7128	0.2433	0.9661
sd210	7.7121	2.6061	0.9980	148.2308	2.9318	0.9809	2.6811	0.2753	0.9842
Sd211	10.2748	4.5510	0.9965	52 595.5691	5.0883	0.994	5.0243	0.266	0.9609
Sd212	10.7854	4.4233	0.9966	44 524.3326	4.9117	0.9951	4.3400	0.2387	0.9561
sd214	13.1670	5.2761	0.9966	937 234.4714	5.7129	0.9928	6.3681	0.2250	0.9495
sd216	14.8351	6.1287	0.9865	27 166 607.2800	6.7100	0.9976	12.0199	0.2431	0.9666
sd218	15.8776	5.2996	0.9944	2 506 201.2550	5.6850	0.9901	7.9638	0.2018	0.9601
sd220	16.5093	5.5267	0.9957	6 238 130.2400	5.9230	0.9930	6.5698	0.1801	0.9419
sd222	17.5266	4.9630	0.9968	2 586 128.7660	5.4940	0.9889	10.3893	0.1986	0.9678
sd225	19.0172	4.5346	0.9972	770 576.6330	4.9288	0.9814	6.7653	0.1597	0.9555
sd227	19.2082	4.3354	0.9920	467 746.4948	4.7472	0.9764	6.6048	0.1577	0.9582
sd39	7.0527	3.1730	0.9984	4295.4862	4.8199	0.9862	3.5444	0.3432	0.9815
sd310	7.8607	3.2457	0.9998	1592.7317	4.0557	0.9882	2.9510	0.2823	0.9659
sd311	8.6244	3.2815	0.9988	1789.5767	3.9351	0.9882	2.5692	0.2384	0.9480
sd312	9.0552	3.0966	0.9993	965.5433	3.5662	0.9841	2.4324	0.2207	0.9532
sd314	9.6447	3.0828	0.9961	1175.6847	3.5595	0.9900	2.3476	0.2029	0.9541
sd316	10.7471	2.8184	0.9956	720.2774	3.1900	0.9841	2.1091	0.1720	0.9556
sd318	11.8765	2.9983	0.9963	1219.0805	3.2676	0.9823	2.0005	0.1489	0.9395
sd320	13.1845	3.3689	0.9978	5085.8114	3.6877	0.9832	1.9284	0.1298	0.9154
sd322	14.1696	3.0599	0.9965	2097.7211	3.2523	0.9753	1.8356	0.1179	0.9245
sd325	15.2114	2.9232	0.9950	2235.6399	3.1935	0.9777	2.3182	0.1276	0.9553
sd327	16.7618	3.3903	0.9967	10 822.1473	3.6424	0.9771	2.2442	0.1126	0.9293
sd49	6.8504	3.2363	0.9999	242.4575	3.3599	0.9848	1.7355	0.2356	0.9228
sd410	7.8579	3.2498	0.9995	1625.4842	4.0613	0.9840	1.6451	0.1984	0.9105
sd411	9.7781	4.7499	0.9981	96 518.6880	5.4681	0.9912	5.9808	0.2998	0.9627
sd412	10.1260	4.8333	0.9974	78 247.8665	5.2936	0.9874	5.4037	0.2783	0.9543
sd414	11.0202	5.0216	0.9988	107 871.0491	5.2293	0.9869	4.2411	0.2308	0.9331
sd416	12.6806	6.0373	0.9963	6 076 022.6440	6.5330	0.9968	7.6378	0.2473	0.9452
sd418	12.9765	5.8222	0.9969	1 699 809.6770	5.9660	0.9882	6.6919	0.2311	0.9413
sd420	13.4610	5.3429	0.9986	961 808.3901	5.6676	0.9890	5.7825	0.2127	0.9420

续表

样地	Weibull			Korf			Mitscherlich		
	b	*c*	R^2	*b*	*c*	R^2	*l*	*m*	R^2
sd422	13.9235	5.3257	0.9975	977 188.7061	5.5949	0.9910	5.1894	0.1967	0.9422
sd425	14.6465	4.8359	0.9983	453 451.4805	5.2072	0.9874	4.3751	0.1756	0.9352
sd427	14.9530	5.3540	0.9965	2 596 547.5710	5.8100	0.9935	4.3421	0.1695	0.9277

注：na16 为年株林场场部后山 a_1 小区 6 年生林分，qa16 为年株林场青石湾 a_1 小区 6 年生林分，sa19 为山下林场 a_1 小区 9 年生林分，其余依此类推。